



Programme REBECCA **(REcherche Biomasse-Energie Canne à CApesterre Belle-Eau)**

Rapport final phase1

Jean-Louis Chopart

chef de programme,

à partir des contributions de :

Volet agro-variétal : **Chopart JL, Auzoux S, Bachelier B, Bastianelli D, Bonnal L**

Volet Chlordécone : **Chopart JL, Lebert B, Marie P, Mouras S**

Volet Economie environnement : **Blazy JM, Bilonière M, Causeret F, Chopart JL
Chopin P, Diman JL, Fusillier JL Guindé L, Lejars C, Merle T**



**Vue aérienne d'une partie du dispositif expérimental REBECCA (dispositifs statistiques)
à la ferme du Fromager, Capesterre-Belle-Eau, le 1 juin 2012.**

Juillet 2012

Avertissement

Un premier rapport scientifique et technique du rapport d'exécution intermédiaire du programme REBECCA a été rédigé en octobre 2011. Il portait sur la première année du programme de mai 2010 à fin mai 2011. Ce rapport comportait également un volet administratif et financier (qui s'arrêtait au 30 avril 2011). Ce rapport a été remis à la DRRT mi-octobre 2011. La partie scientifique du rapport a fait l'objet d'une note scientifique (Note scientifique n° 4 REBECCA) diffusée en janvier 2012.

Un second rapport scientifique et technique a porté sur la période comprise entre le 1^{er} juin 2011 et le 31 janvier 2012. Il a accompagné le second rapport financier qui s'arrête un mois avant au 31 décembre 2011 pour des raisons techniques et comptables.

Ce rapport final couvre toute la période de la phase 1 entre fin mai 2010 et fin juin 2012.

Il reprend forcément des éléments des rapports précédents, mais synthétisés, et il fait part des nombreux résultats obtenus entre le 1 janvier 2012 et le 30 juin 2012.



Sommaire

| | |
|---|-----------|
| RESUME (des actions et conclusions)..... | 6 |
| INTRODUCTION..... | 11 |
| 1. VOLET AGRO-VARIÉTAL | 13 |
| 1.1 Elaboration de modèles d'estimation de la qualité de la biomasse (fibres, sucres, PCI) par analyse SPIR..... | 15 |
| 1.1.1 Méthodes d'étude | 15 |
| 1.1.2 Résultats | 15 |
| 1.1.3 Conclusions partielles..... | 17 |
| 1.2 Evaluation et sélection variétale | 18 |
| 1.2.1 Dispositifs d'étude et conditions climatiques | 18 |
| 1.2.2 Résultats obtenus sur les 16 variétés testées en essais statistiques | 22 |
| 1.2.3 Qualité de la biomasse fibres, humidité, pouvoir calorifique | 27 |
| 1.2.4 Autres critères de sélection et synthèse des résultats..... | 30 |
| 1.2.5 Conclusion de la partie sélection variétale | 31 |
| 1.3 Etudes agronomiques. Première contribution à la mise au point d'itinéraires techniques de production performants et durables | 33 |
| 1.3.1 Effets des dates de plantation et des durées de cycle sur le rendement et la qualité de la biomasse des variétés issues de la collection du CIRAD les plus prometteuses | 33 |
| 1.3.2 Estimation de la biomasse résiduelle potentiellement disponible après une culture de canne à usage de combustible..... | 36 |
| 1.3.3 Conclusions partielles Perspectives..... | 47 |
| 1.4 Multiplications des meilleures variétés en vue d'une phase 2..... | 47 |
| 1.5 Elaboration d'une base de données REBECCA-BD-A | 49 |
| 1.5.1 Contexte et généralités sur l'outil..... | 49 |
| 1.5.2 Quelques éléments de présentation..... | 49 |
| 1.5.3 Conclusions partielles..... | 50 |
| 1.6 Relations fonctionnelles entre le rendement de matière sèche et le rendement calorifique | 51 |
| 1.6.1 Objectifs | 51 |
| 1.6.2 Résultats | 51 |
| 1.6.3 Conclusions partielles..... | 52 |

| | |
|---|------------|
| 2. VOLET CHLORDÉCONE..... | 53 |
| 2.1 Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines | 53 |
| 2.1.1 Matériel et méthode | 53 |
| 2.1.2 Résultats | 56 |
| 2.1.3 Discussion et conclusion..... | 62 |
| 2.2 Combustion en laboratoire de tiges de canne à sucre contaminées par la chlordécone..... | 63 |
| 2.2.1 Analyse des cendres après combustion dans un four à moufle à différentes températures ... | 63 |
| 2.2.2 Analyse des gaz de combustion dans un four à cuillère et analyse des produits de combustion | 64 |
| 2.2.3 Conclusions partielles..... | 65 |
| 2.3 Teneur des cendres en chlordécone après combustion en chaudière industrielle de bagasse de canne à sucre contaminée..... | 65 |
| 3. VOLET ÉCONOMIE ET ENVIRONNEMENT | 67 |
| 3.1 Premières études préliminaires en 2011: Etat des lieux | 68 |
| 3.2 Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de biomasse issue de canne à fibres à Capesterre-Belle-Eau | 70 |
| 3.2.1 Méthode employée pour estimer le gisement agricole potentiel | 70 |
| 3.2.2 Résultats | 75 |
| 3.2.3 Discussion et perspectives, conclusions partielles | 90 |
| 3.3 Méthode et outils en vue de l'analyse de la rentabilité de la nouvelle filière..... | 93 |
| 3.3.1 Objectifs et attendus de l'étude | 93 |
| 3.3.2 Méthode et outils développés | 93 |
| 3.3.3 Premiers résultats..... | 100 |
| 3.3.4 Sensibilité à quelques facteurs..... | 104 |
| 3.3.5 Conclusion..... | 105 |
| 3.4 Analyse du cycle de vie de la filière canne fibre en Guadeloupe | 106 |
| 3.4.1 Introduction | 106 |
| 3.4.2 L'ACV d'une filière canne combustible : définition objectifs | 106 |
| 3.4.3 Méthodes et résultats | 107 |
| 3.4.4 Analyses de sensibilité | 109 |
| 3.4.5 Autres fonctionnalités de l'outil | 110 |
| 3.4.6 Conclusions partielles Perspectives..... | 111 |

| | |
|--|------------|
| 4. ACTIVITÉS DU CHEF DE PROGRAMME..... | 112 |
| 4.1 Activités managériales | 112 |
| 4.2 Activités scientifiques..... | 113 |
| 4.3Activité d’information auprès du CODIR et du COPIL..... | 115 |
| 4.4 Information extérieure auprès des décideurs et du public..... | 115 |
| CONCLUSION PERSPECTIVES | 117 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 120 |
| ANNEXES | 125 |

RESUME (des actions et conclusions)

Le projet Rebecca

Le projet REBECCA (REcherche Biomasse Energie Canne CApesterre) est un programme de recherche qui a pour ambition d'identifier les conditions de développement d'une filière agro-industrielle "biomasse énergie" sur le territoire de la commune de Capesterre-Belle-Eau, située en Basse-Terre, Guadeloupe. Il s'agit de cultiver des cannes à sucre riches en fibres destinées à approvisionner une centrale électrique, dans un cadre de réduction de la dépendance énergétique de la Guadeloupe, en particulier dans des sols pollués à la chlordécone.

Si les différents aspects de la valorisation de la biomasse issue de l'industrie de la canne à sucre (bagasse) sont connus et maîtrisés, l'utilisation de canne à sucre entière, à des seules fins de production électrique, nécessite la mise en place d'un programme de recherche et de développement pour répondre à des questions d'ordre agronomique, environnemental économique, et industriel.

Le programme de recherche REBECCA a pour objet de répondre à ces questions avec un objectif d'applicabilité industrielle. Ce programme a été réalisé dans le cadre d'un partenariat recherche/industrie, conclu entre le CIRAD (Paris et Capesterre) pour les volets agro-variétal, chlordécone et une partie du volet économie et la société Cann'elec Développement (St Nazaire) pour les aspects industriels. Le volet économie du programme a bénéficié d'un appui sous la forme d'une assistance contractualisée de l'INRA (Centre Régional Antilles-Guyane, Unité de Recherche sur les Agrosystèmes Tropicaux).

Cette première phase, principalement agronomique, vise à conduire des recherches sur la possibilité de produire de l'électricité à partir de biomasse végétale de cannes fibreuses à forte biomasse dans la région de Capesterre-Belle-Eau, avec exigence de durabilité. Les perspectives agricoles, environnementales, énergétiques et industrielles seront mieux documentées à l'issue de la première phase du projet, pour permettre une seconde phase qui tienne compte de l'expérience de la première phase et utilise les données, outils, savoirs et dispositifs expérimentaux disponibles en fin de phase 1.

La phase 1 a été financée par le FEDER pour 1044 K€ avec une contrepartie venant du CIRAD pour 184 K€ (15%). Le chef du programme était un chercheur agronome du Cirad (Jean-Louis Chopart) qui a rendu compte régulièrement de son travail à deux comités instaurés pour la gouvernance du projet : CODIR regroupant les instances des deux partenaires (Cirad et Cann'elec développement), et COPIL présidé par le Délégué Régional de la Recherche et de la Technologie (DRRT) et regroupant les principaux acteurs et décideurs, dont la Région.

Résultats du volet agro-variétal

Des modèles permettant d'estimer les taux de fibres et le pouvoir calorifique du matériel testé par la technologie SPIR (spectrométrie dans le proche infra-rouge) ont été élaborés avec l'appui d'une unité de recherche du Cirad spécialisée dans ce domaine. Les teneurs en fibres, en sucres, le pouvoir calorifique de la matière sèche (PCI et PCS) du matériel végétal du programme peuvent maintenant être estimés localement, facilement, et avec une précision satisfaisante, à partir des seules mesures avec l'analyseur de spectrométrie dans le proche infrarouge. Ces travaux constituaient un préalable à la caractérisation du matériel végétal testé.

Un autre préalable était l'établissement d'une base de données permettant de stocker et de mettre en relation les très nombreuses données biométriques et de qualité de la biomasse acquises dans la phase 1 et dans la phase 2. Cet outil, nommé REBECCA-BD-A a été créé en collaboration

avec une informaticienne du Cirad spécialisée dans ce domaine. Il est opérationnel et conçu pour être connectable avec d'autres bases de données et des tableurs.

L'action la plus urgente, démarrée avant même le début du projet, a été la mise en place de dispositifs expérimentaux pour tester les 34 variétés repérées comme potentiellement intéressantes pour être cultivées à des fins énergétiques. La première année, une première sélection a eu lieu dans les dispositifs exploratoires (non statistiques). On a ainsi retenu la moitié d'entre elles (16) pour des tests en essais statistiques mis en place en fin de première année ou au début de la seconde année, avec pour chacun, une variété témoin de canne à sucre très productive dans la région : la R579. Le rendement des tiges usinables de cette variété R579 a été excellent, proche de 140 t/ha dès 8 mois et de 200 t/ha à 12 mois sur le premier essai. Malgré un rendement élevé du témoin R579, quelques variétés ont été supérieures sur les critères de rendement en matière sèche totale (66t/ha de matière sèche avec 70% d'humidité pour la meilleure variété). Les feuilles vertes et sèches et les amarres des variétés étudiées possèdent des teneurs en fibres proches de celles des tiges, avec de très légères fluctuations d'une variété de canne à sucre à l'autre. Il y a donc une grande stabilité de teneurs en fibres de ces parties de la plante. Seules les tiges, qui contiennent plus ou moins de sucres, créent une variabilité significative des constituants du matériau. Il existe également une grande stabilité du pouvoir calorifique exprimé par unité de biomasse sèche, d'une composante de la biomasse à l'autre, avec une valeur moyenne de 16.6 kJ/g de matière sèche. Le rendement énergétique, exprimé en MJ/m² varie donc, essentiellement, avec la variation du rendement en matière sèche de la plante entière. Ce rendement énergétique est ici le principal critère de sélection. Il a atteint 110MJ/m² pour la meilleure variété sur une moyenne de mesures à 8 et à 12 mois. L'écart de rendement énergétique avec le témoin local, performant dans la zone, atteint ou dépasse 25% chez 4 des variétés testées.

En deux ans, 9 variétés intéressantes pour un usage comme combustible ont été identifiées, en année de plantation. Leurs principales performances et propriétés utiles pour cet usage ont été caractérisées. Parmi ces 9 variétés, cinq sont particulièrement prometteuses, trois en provenance du WICSBS de Barbade (WI79460, WI79461, WI79456) et deux du CIRAD (TC8 et BBZ92076).

Les résultats obtenus en fin de phase 1 seront conformes aux objectifs fixés à N+4 ans dans le projet. Toutefois, en repousses, et en conduite satisfaisant un calendrier sub optimal eu égard à la physiologie de la canne (récolte en saison des pluies etc.), les performances ne seront pas forcément identiques à celles de la première année de plantation. L'étude doit donc se poursuivre pour consolider les données.

Mais ces résultats ont déjà permis de choisir les variétés à tester en phase 2 et de fournir des informations utiles aux économistes, environnementalistes et industriel participant au programme REBECCA. Afin d'anticiper la phase 2, puis celle du développement agricole, les meilleures variétés ont été mises en parcelles de multiplication.

L'étude des dates de plantation et de durée de cycle et donc de récolte a débuté en phase 1 avec l'implantation de deux essais agronomiques lourds à partir de juin 2011, dès que l'on a pu commencer à repérer les meilleures variétés et que des boutures ont été disponibles. Ces essais ne pourront donner lieu à une analyse consistante qu'en fin de phase 2, après 24 mois de culture. Il n'est donc pas encore possible de conclure sur les dates de récoltes et la capacité (ou la perte de productivité éventuelle) due à l'exigence de pouvoir produire presque toute l'année. Mais le dispositif d'étude mis en place en phase 1 est prêt à livrer les informations en phase 2.

En revanche, la première étude effectuée sur la biomasse des feuilles tombées naturellement au sol montre que le tonnage de matière sèche, variable suivant les variétés, est très faible et qu'il doit servir en priorité à renouveler la matière organique du sol pour le maintien de son niveau.

Le PCI de la matière sèche totale utile (tiges et feuilles) des cannes est très lié au poids sec de cette même biomasse. Même en mettant ensemble toutes les variétés, les stades de végétation

entre 6 et 12 mois, les dates de coupe, la relation est quasi linéaire et directe : $PCI (MJ/m^2) = 0.0166 MST (g/m^2)$. Grâce à ces résultats, il est maintenant possible de simplifier l'évaluation variétale et agronomique des cannes à sucre à usage énergétique en ne considérant que la plante entière. Il est ainsi possible d'envisager un mode simplifié de paiement au producteur de sa production de canne combustible. Il consisterait en deux mesures simples sur sa biomasse à vendre : le poids de la production dans la remorque et l'humidité moyenne de la biomasse.

Avec l'utilisation du modèle proposé, reliant la matière sèche totale avec le PCI de celle-ci, et l'utilisation de relations connues liant le PCI des matières sèches et humides, l'agriculteur devrait pouvoir connaître, presque immédiatement, la valeur marchande de son produit et l'acheteur, le rendement énergétique potentiel de la production.

Résultats du volet chlordécone

Concernant les études sur la chlordécone dans la plante, il a fallu attendre les premiers résultats variétaux pour limiter les analyses aux variétés les plus prometteuses (coût élevé de ces analyses). Les premiers résultats portant sur la répartition de la chlordécone dans les différentes composantes de la biomasse sont néanmoins prometteurs et innovants.

En année de plantation, les racines ont une teneur en CLD de près de 10 mg/kg de matière sèche environ 10 fois supérieure à celle des tiges souterraines dont la teneur est entre 40 à 100 fois supérieure à celle des premiers entre-nœuds aériens. Il y a donc un très fort gradient de concentration entre les racines, qui absorbent et stockent la CLD, et les parties aériennes, les données étant exprimées en poids de CLD par kg de biomasse. Ce fort gradient reste visible lorsque les données sont exprimées par surface de culture. Il y a peu de CLD dans les parties hautes des tiges (de l'ordre de 0.003mg/kg). Les racines paraissent jouer un rôle de filtre et de lieu de stockage de la CLD. Mais les racines restant dans le sol, la CLD racinaire n'est pas exportée. Les parties aériennes les plus contaminées, c'est-à-dire les cinq à dix premiers centimètres des tiges aériennes, restent, elles aussi, sur la parcelle, puisqu'elles sont situées sous le niveau de la coupe.

D'un point de vue pratique, les composantes de la biomasse les plus contaminées par la CLD n'étant pas exportées, les quantités de CLD brûlées lors de la combustion seront donc relativement faibles, ce qui limitera l'impact environnemental de cette filière, qu'il soit positif « bio épurateur », comme négatif, émission de fumées ou gaz toxiques.

D'un point de vue scientifique et générique, les résultats, concernant les racines de cinq variétés de cannes en année de plantation, ouvrent la voie à une compréhension et à une modélisation du transfert de la CLD dans le système sol-eau-plante. Ils doivent être confirmés en situation de repousse (années 2 et suivantes), qui donne lieu à un renouvellement partiel du système racinaire. Les études concernant la combustion en laboratoire ont permis de faire avancer la connaissance sur la combustion de la chlordécone pure mais ont aussi montré les limites de la représentativité de la combustion de tiges de cannes dans des conditions de laboratoire (ce qui est, en soi, un résultat). En effet, la nature des produits de dégradation thermique de la CLD est très dépendante de la température. Il est donc difficile de prédire ce qui se passera en chaudière où les conditions de température et de temps de séjour peuvent être différentes et variables dans le foyer.

Résultats du volet économique et environnemental

Une étude préliminaire (stage de master de l'UAG) a permis de jeter les premières bases des estimations : (i) sur le gisement des surfaces potentiellement disponibles pour la canne combustible dans la commune de Capesterre-Belle Eau (200 ha de canne à sucre, sans compter la canne rhum et 900 ha de jachères et friches diverses, certaines sur des pentes), (ii) sur les prix à payer aux producteurs. Les estimations de surfaces potentielles étant inférieures à celles annoncées dans le projet initial, il a été demandé à l'INRA Antilles Guyane de procéder à une

analyse fine du gisement potentiel pour la mise en place d'une filière agro-industrielle « biomasse énergie » sur le territoire de la commune de Capesterre-Belle-Eau, suivant différents scénarios.

Pour évaluer le gisement potentiel, l'INRA s'est appuyé sur un jeu de données décrivant le parcellaire actuel de la commune de Capesterre-Belle-Eau et sur un corps d'hypothèses relatives aux conditions d'implantation d'une culture de canne à fibres (CF). Pour estimer quantitativement le gisement agricole potentiel de CF, un simulateur a été développé (GIZKAN). Il permet d'évaluer le gisement surfacique et massique sous différents scénarios agro-économiques. Ces scénarios ont été établis suite à une analyse préalable de l'usage actuel des sols sur la commune et des entrevues auprès des différents acteurs du secteur agricole dans la zone étudiée. Les paramètres d'éligibilité retenus sont relatifs aux caractéristiques des parcelles (usages, contraintes pédoclimatiques et topographiques, tenure foncière), à la rentabilité des spéculations en présence (marge à l'hectare), au prix d'achat de la canne à fibres (€/tonne), à la productivité surfacique (rendement agronomique en tonnes/hectare/an) et à l'existence de politiques économiques de soutien aux différentes filières. Douze scénarios différents ont été simulés pour deux valeurs de prix d'achat de la canne à fibres (45 et 65€/tonne) et deux niveaux de rendements (100 et 150 tonnes/ha/an).

Les résultats montrent que le programme REBECCA intervient dans une situation où Capesterre-Belle-Eau comporte une SAU de près de 2400 hectares, en régression par rapport au précédent recensement agricole. Les principaux usages du sol sont la culture de la banane (1235 ha), la canne à sucre pour le sucre et le rhum (398 ha) et les jachères (336 ha). Environ 200 ha de cultures sont dédiés à la diversification agricole et au marché local. Le reste des surfaces s'apparente à des espaces pâturés ou des friches et bois. Les simulations de gisement montrent le poids déterminant de quatre paramètres dans la formation du gisement : le rendement agronomique, le prix d'achat de la canne à fibres, l'existence d'un soutien à la conversion vers la canne à fibres et les possibilités techniques de mécanisation. En fonction des valeurs prises par ces paramètres, le gisement peut varier d'un facteur 1 à 10. Le scénario S6 avec un rendement de 150 tonnes/hectare de matière fraîche totale vendue et un prix d'achat de 45€/tonne aboutit à un gisement de 500 hectares environ. Un peu plus de la moitié du gisement proviendrait alors des parcelles actuellement en canne à sucre (268 ha), et le reste proviendrait essentiellement de parcelles en jachère (180 ha). Un peu plus de 50 hectares du gisement potentiel proviendrait de surfaces en herbe (savane pâturée, prairie). Sur les 336 hectares de jachère présents à Capesterre, 156 hectares sont inaccessibles du fait de contraintes pédoclimatiques et topographiques pour l'implantation et la récolte de la canne. Pour les mêmes raisons, seuls 7 ha de friches sont accessibles sur les 50 ha présents sur la commune de Capesterre-Belle-Eau.

L'analyse de l'évolution du parcellaire sous l'effet de l'introduction du nouveau débouché montre, dans le scénario S6, que 26 hectares de « banane créole » pourraient « basculer » vers la canne à fibres. Si l'on souhaite « protéger » les cultures alimentaires commercialisées sur le marché local d'un changement d'usage du foncier correspondant, un moyen simple est de conditionner la prime à la conversion de 1000€/ha/an au fait que l'usage actuel du sol ne soit pas de ce type. Cette mesure permettrait, dans ce cas, de maintenir entièrement la banane créole qui resterait plus rentable que la canne à fibres. Dans le scénario (S6), la totalité des surfaces en banane export, en ananas et en autres cultures n'est pas affectée par l'introduction de la filière de production d'électricité à partir de canne à fibres. Dans ce cas, le gisement potentiel pour approvisionner cette nouvelle filière serait de 500 hectares pour une production de 75 000 tonnes de biomasse par an.

Une démarche et des outils ont été développés pour évaluer la rentabilité économique de cette filière. Un premier outil permet d'estimer le prix de revient de l'électricité en fonction notamment du prix d'achat de la matière première, des coûts de fonctionnement et d'investissement dans l'unité de production, puis de comparer ce prix et son évolution avec le prix du mix électricité de

Guadeloupe. Un second outil évalue les postes de coûts pour les agriculteurs et l'industriel, puis d'estimer la valeur ajoutée et sa distribution à l'échelle de la filière ainsi que les indicateurs de rentabilité du projet. Deux scénarios ont ensuite été testés, l'un pour des usines de 5MW et 10MW. L'évaluation de ces scénarios met en évidence les paramètres déterminants de la faisabilité de cette filière. Il s'agit des rendements techniques (rendement agricole de canne fibre, couplé avec le rendement de conversion électrique), de la qualité de la biomasse (taux d'humidité et PCI), du coût de la biomasse (prix payé, transport etc.) et de la dimension du gisement de biomasse et de la centrale. Sur ce dernier point, il apparaît que les économies d'échelle sont importantes dans la gamme de puissances testées, ce qui pénalise les unités de plus petite taille. Le jeu de paramètres testés visait à trouver le compromis qui rende acceptable les conditions de rémunération des trois acteurs (prix de l'électricité pour EDF, prix de la canne pour les planteurs et taux de rémunération des capitaux pour l'industriel).

Il ressort qu'avec les scénarios simulés et les hypothèses retenues, la rentabilité du projet n'est pas facilement atteinte. Avec un prix d'achat de la canne-fibre à 45 €/t et les rendements retenus, le projet dans les deux scénarios 5 et 10 MW, n'apparaît pas faisable du point de vue des acteurs, industriel et acheteur d'électricité. Avec un prix de la canne sous les 35 €/t, le projet devient faisable pour l'industriel mais n'est plus attractif pour le planteur. Trois voies restent à approfondir pour que le projet soit rentable avec un prix incitatif pour les planteurs : (i) l'octroi de subventions à la production notamment pour des services environnementaux rendus par la filière ; (ii) l'amélioration des rendements techniques, aux niveaux agricole et industriel ; (iii) un complément d'approvisionnement par une biomasse de type résidu valorisée à un coût marginal de ramassage-transport afin d'abaisser le poste de charge prépondérant de la filière.

Enfin, une étude a été menée, relative aux aspects environnementaux de la nouvelle filière et à ses aspects positifs et négatifs dans ce domaine. Elle a été faite par un CDD spécialisé en Analyse de Cycle de Vie, en relation avec les économistes et l'agronome chef du programme ; les scénarios testés correspondent à ceux proposés par les économistes de l'INRA et du CIRAD. Cette étude vise, entre autre, à donner des éléments objectifs pour que les décideurs jugent utile ou pas d'apporter un soutien au développement de la filière canne fibre par la fourniture d'indicateurs d'impacts potentiels. A cet effet, un outil spécifique a été élaboré (REBECCA-ACV). L'outil est au point. En revanche, comme prévu au départ, les résultats préliminaires ayant servi à tester l'outil sont provisoires du fait des incertitudes, en phase 1, sur des paramètres d'entrée essentiels. Le bilan environnemental est en effet construit à partir de nombreuses hypothèses et paramètres qui doivent être contextualisés. Ces paramètres d'entrée seront affinés en phase 2 sur :

- des connaissances plus précises en ACV spécifiques pour la Guadeloupe
- des paramètres essentiels comme le rendement de la canne combustible
- le devenir des éléments dans le sol notamment C et N en fonction des modes de gestion du sol
- une éventuelle biomasse additionnelle en provenance notamment de la filière sucre.

Les résultats environnementaux obtenus en phase 2 devront être mis en balance avec les indicateurs agronomiques et économiques, afin de proposer des choix optimisés.

Ces résultats agronomiques, environnementaux et économiques, très riches et innovants, en particulier sur le plan des outils d'étude, ont été obtenus en très peu de temps donc, forcément, un peu en parallèle. Ils ont été obtenus par des équipes pluridisciplinaires, qui ne se connaissaient pas au départ et sont relatifs à une filière nouvelle (la canne combustible). Enfin, il a fallu apprendre à travailler ensemble, entre des partenaires de culture différente (agronomique, économique, environnementale, industrielle). L'intégration des résultats et des modèles économiques est une nécessité pour évaluer la faisabilité et l'intérêt de cette nouvelle filière de canne à usage de combustible. Un travail en commun a pris forme en phase 1.

INTRODUCTION

Contexte et justification locales

Le projet REBECCA (REcherche Biomasse Energie Canne CApesterre) est un programme de recherche qui a pour ambition d'identifier les conditions de développement d'une filière agro-industrielle "biomasse énergie" sur le territoire de la commune de Capesterre-Belle-Eau, située en Basse-Terre, Guadeloupe. La filière a pour but de cultiver des cannes à sucre riches en fibres destinées à approvisionner une centrale électrique. Les objectifs principaux sont la réduction de la dépendance énergétique de la Guadeloupe vis-à-vis d'énergies fossiles exogènes et la diversification des débouchés pour l'agriculteur, en particulier dans des sols pollués à la chlordécone.

En 2006, en Guadeloupe, les émissions de GES se sont élevées à 2 700 000 tonnes d'équivalent CO₂. Les émissions d'origine énergétique, c'est-à-dire issues de la production d'électricité et de la consommation de carburants, sont responsables de 67% de ces émissions (soit 1 765 000 de tonnes de CO₂). Ceci équivaut à une émission de 4,8 tonnes de CO₂ par an et par habitant (ce qui est inférieur à la moyenne nationale de 5,5 tonnes de CO₂ par an et par habitant). La production d'électricité émet à elle seule 1 360 000 tonnes de CO₂, soit 50% du total des émissions (Billionnière, 2011).

La chlordécone est un pesticide qui a été utilisé par les producteurs de banane entre 1981 et 1993 pour le traitement des bananiers contre le charançon. Ce polluant organique rémanent dans les sols peut être à l'origine d'une contamination de certaines cultures (comme les racines et tubercules). Capesterre-Belle-Eau, commune bananière par excellence, est concernée au plus haut point par la problématique de la gestion des sols contaminés à la chlordécone.

Si les différents aspects de la valorisation de la biomasse issue de l'industrie de la canne à sucre (bagasse) sont connus et maîtrisés, l'utilisation de toute biomasse de la canne à sucre à des seules fins de production électrique, nécessite la mise en place d'un programme de recherche et de développement pour répondre à des questions d'ordre agronomique (sélection des variétés les plus adaptées, mise au point d'un itinéraire technique et d'une organisation logistique pour l'approvisionnement de l'usine, bilan de matière organique dans le sol etc.), environnemental (quantification des risques liés à l'évolution de la chlordécone au cours du process, bilan environnemental, etc.) et économique (estimation de la surface agricole potentielle, impact économique de la filière pour les différents acteurs du territoire, etc.).

Objectifs généraux du programme REBECCA conventions et partenariat

Le programme de recherche REBECCA a pour objet de répondre à ces questions avec un objectif d'applicabilité industrielle. Le programme REBECCA s'appuie sur un projet de recherche élaboré en 2009, labellisé par les pôles de compétitivité Synergile et Capénergies. Une convention a été signée entre le Préfet de Guadeloupe et le Directeur du Cirad en avril 2010. Cette convention dit en particulier que le projet a :

« une durée globale de quatre à cinq ans, décomposé en 2 sous-projets de 2 années, portant sur la réalisation d'un programme de recherche agronomique et de développement économique. Ces différents travaux seront conduits en Guadeloupe. »

« La première phase 2010-2012 est essentiellement constituée par une activité de recherche agronomique, permettant d'arrêter, à l'issue de cette phase, les caractéristiques principales de la biomasse, compatible avec les objectifs énergétiques (taux de fibre, humidité, PCI, modélisation

et évolution de la molécule chlordécone,...). Cette étape sera portée par le CIRAD qui en sera le maître d'œuvre. »

Ce programme a été réalisé dans le cadre d'un partenariat recherche/industrie, conclu entre le CIRAD (Paris et Capesterre) pour les volets agro-variétal, chlordécone et une partie du volet économie et la société Cann'elec Développement (St Nazaire) pour les aspects industriels.

Le volet économie du programme a bénéficié d'un appui sous la forme d'une assistance contractualisée de l'INRA (Centre Régional Antilles-Guyane, Unité de Recherche sur les Agrosystèmes Tropicaux).

Objectifs de la phase 1

Conformément à la convention, cette première phase, principalement agronomique, vise à conduire des recherches sur la possibilité de produire de l'électricité à partir de biomasse végétale de cannes fibreuses à forte biomasse dans la région de Capesterre-Belle-Eau. Pour cela, il faut disposer d'une production, aussi continue et régulière que possible au cours de l'année malgré le climat humide, de biomasse à capacité énergétique plus forte que la canne à sucre. En outre, cette production devra être durable, propre et rentable. Les études effectuées et qui seront rapportées dans ce document visent à :

- ⇒ Sélectionner, parmi le matériel disponible, quelques variétés prometteuses fournissant le maximum de calories par unité de surface et de temps.
- ⇒ Bâtir des expérimentations agronomiques, avec les variétés prometteuses, visant à trouver des pratiques culturales permettant de produire presque toute l'année avec ces variétés.
- ⇒ Suivre l'évolution de la chlordécone dans la plante et les produits de combustion.
- ⇒ Caractériser les aspects économiques et environnementaux d'une nouvelle filière biomasse-électricité à la Guadeloupe.

Les perspectives agricoles, environnementales, énergétiques et industrielles seront mieux documentées à l'issue de la première phase du projet, pour permettre une seconde phase qui tienne compte de l'expérience de la première phase et utilise les données, outils, savoirs et dispositifs expérimentaux disponibles en fin de phase 1.

Financement de la phase 1 et mode de fonctionnement

La phase 1 a été financée par le FEDER pour 1044 K€ avec une contrepartie venant du CIRAD pour 184 K€ (15%). Le chef du programme était un chercheur agronome du Cirad (Jean-Louis Chopart) qui a rendu compte régulièrement de son travail à deux comités de contrôle:

- CODIR (comité de direction) regroupant les instances des deux partenaires (Cirad et Cann'elec développement),
- COPIL (comité de pilotage), dirigé par le Délégué Régional de la Recherche et de la Technologie (DRRT) et regroupant les principaux acteurs et décideurs dont la Région.

Au cours de cette première phase de 2 ans, le CODIR s'est réuni six fois et le COPIL quatre fois.

1. VOLET AGRO-VARIÉTAL

Coordinateur : JL Chopart

Introduction, objectifs et annonce du contenu

(JL Chopart)

Le volet agro variétal a constitué le principal axe de recherche au cours de la phase 1. En effet, d'une part, il fallait disposer des informations sur ce volet pour avancer sur les deux autres volets, et d'autre part, il nécessitait la mise en place de dispositifs expérimentaux de terrain avec de la canne à sucre récoltée au bout de 12 mois. Il fallait donc avancer très vite sur ce volet au cours de la phase 1 de 2 ans. Pour l'analyse de ces résultats de terrain, il a fallu mener des travaux de laboratoire et informatique qui sont donc intégrés dans ce volet. Pour mieux comprendre la cohérence et la continuité dans ces actions, une brève présentation en est faite ci-dessous.

Sélection variétale et qualité des produits

L'objectif prioritaire au cours de la première phase de 2 ans du programme REBECCA était de sélectionner environ cinq variétés parmi les 35 disponibles pour focaliser les études de la seconde phase sur ces quelques variétés, en particulier leur comportement en repousse et dans des environnements différents de celui du Fromager. Cela a donc été l'axe principal de recherche au cours de la phase 1 en volume de travail. Du fait de la longueur du cycle de la canne à sucre (12 mois), ces variétés n'ont été identifiées que dans les dernières semaines de la phase 1 du programme (2 ans).

Etudes agronomiques. Première contribution à la mise au point d'itinéraires techniques de production performants et durables

Ces études ont compris en phase1, deux opérations :

- *Optimisation des dates et cycles de culture*

Toutefois, dès le début de la deuxième année du programme en juin et août 2011, des essais agronomiques ont été mis en place avec les variétés qui, à l'époque, apparaissaient comme les plus prometteuses et dont on disposait d'assez de tiges bouturables. Ces essais visent à trouver les moyens de produire toute l'année en optimisant cette production, même en période plus défavorable. Les premiers résultats obtenus dans ces essais agronomiques sont consignés dans ce rapport, mais il n'est pas possible, en fin de phase1, de tirer des conclusions de ces essais programmés pour durer au moins 2 ans et qui seront donc valorisés en phase 2.

- *Première étude sur la biomasse résiduelle en culture de canne à usage de combustible*

Un aspect agronomique important de ce programme est la fertilité du sol et, en particulier, le maintien de la teneur en matière organique du sol dans un futur système où, structurellement, le maximum de biomasse et donc de matière organique sera exporté du champ pour servir de combustible. Ceci sera étudié en phase 2 avec les variétés les plus productives mais, dès la phase 1, une étude a été effectuée pour quantifier les différentes sources de matière organique restant ou pouvant revenir dans le sol dans un système de culture de canne à usage de combustible. Ce travail a fait l'objet d'une note scientifique.

Elaboration d'une base de données pour les résultats variétaux et agronomiques

Pour stocker et gérer les nombreux résultats obtenus dans les essais variétaux et agronomiques du programme REBECCA, une base de données spécifique à ce programme a été élaborée (REBECCA-BD-A), en collaboration avec une spécialiste du CIRAD Montpellier. Ce travail est achevé et servira, bien sûr, en phase 2. Cette base de données a fait l'objet d'une note scientifique (Auzoux et al. 2012).

Relation fonctionnelle entre le rendement en matière sèche de la biomasse de canne à sucre et son rendement calorifique

L'objectif du programme REBECCA ne se limite pas à trouver les voies et moyens de produire le maximum de biomasse tout en en laissant suffisamment au sol pour maintenir le stock organique. Il s'agit aussi, et surtout, de produire, avec ces biomasses, le maximum d'énergie potentielle par unité de surface et de temps, comme cela a été indiqué ci-dessus.

De plus, il faut, si possible, trouver des relations simples entre la biomasse produite et son rendement énergétique pour faciliter la sélection variétale et pour contribuer à élaborer un mode de paiement au producteur simple et objectif. Une étude a donc été menée sur les relations entre le rendement en matière sèche de la biomasse de canne à sucre et son rendement calorifique.

Méthodes et modèles d'estimation de la qualité de la biomasse produite (teneur en fibres et pouvoir calorifique)

Pour pouvoir initier ces études variétales, agronomiques et énergétiques, un préalable était de pouvoir caractériser, de façon aussi simple et rapide que possible, la qualité de la biomasse produite. Dans le cadre du programme, la qualité se caractérise principalement par la teneur en fibres et son pouvoir calorifique (défini par les pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur (kJ/g)). Un recours à des méthodes d'analyse conventionnelles pour caractériser les très nombreux échantillons aurait été extrêmement coûteux. C'est pourquoi, le programme a eu recours à l'évaluation de ces paramètres grâce à des mesures par spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge (SPIR). L'élaboration de modèle spécifique à notre matériel végétal et à notre équipement scientifique a débuté dès l'arrivée de l'appareil, début octobre 2010.

Cette opération de recherche, menée principalement au laboratoire et au CIRAD Montpellier, n'est pas directement de la recherche agro-variétale. Mais, parce qu'elle a commencé dès le début du programme et que les résultats étaient un préalable à l'obtention de tous les résultats de ce volet agro-variétal, cette opération de recherche sera présentée dans le volet agro-variétal de ce rapport et au tout début de celui-ci.

1.1 Elaboration de modèles d'estimation de la qualité de la biomasse (fibres, sucres, PCI) par analyse SPIR

(Laurent Bonnal, Jean-Louis Chopart, Denis Bastianelli, Patrice Jacquet)

1.1.1 Méthodes d'étude

L'appareil de mesures par spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge (SPIR) de marque Spectra Star (photo 1) a été commandé, après une phase de mise en concurrence sur les performances et les prix, en suivant les conseils d'une équipe de spécialistes de la caractérisation de la biomasse végétale par le SPIR (Denis Bastianelli-Laurent Bonnal de l'UMR SELMET).

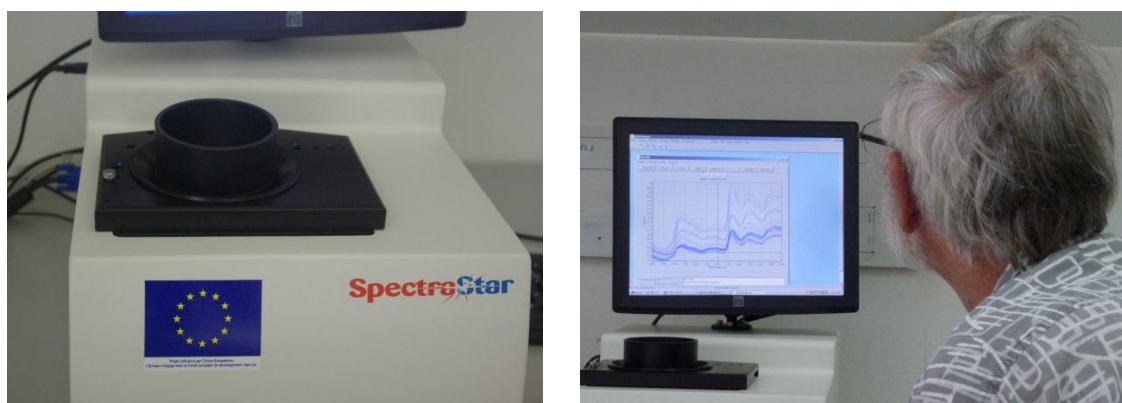


Photo n°1 Appareil de mesure de la qualité de la biomasse dans le programme REBECC par spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge (SPIR) et spectres de réflectance affichés.

Le calage d'un modèle expérimental permettant d'estimer la qualité de la biomasse (teneurs en cellulose, hémicellulose, lignine, sucres) a été réalisé en collaboration avec cette équipe, dès que du matériel végétal issu du programme et représentatif (cannes âgées de 8 mois) a été disponible. Cette calibration s'est faite entre décembre 2010 et janvier 2012, à partir de spectres SPIR et d'analyses chimiques de référence de 259 échantillons issus des premiers tests variétaux non statistiques du programme REBECCA qui ont servi au calage du modèle. A ces échantillons issus du programme ont été ajoutés 280 échantillons issus des collections du laboratoire d'alimentation animale de l'UMR SELMET.

Parallèlement, l'équipe de l'UMR SELMET a élaboré, dans le cadre du programme REBECCA, un modèle de prédiction du pouvoir calorifique inférieur (PCI) et du pouvoir calorifique supérieur (PCS) de la biomasse des variétés du programme à partir des mêmes mesures effectuées avec l'équipement SPIR du programme. Ceci a fait l'objet d'un stage terminé fin décembre 2011. Durant ce stage, il a été réalisé environ 200 déterminations de PCS et de PCI sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour la création des modèles d'étalonnage pour la prédiction des fibres et des sucres.

1.1.2 Résultats

Fibres, sucres et matières minérales

Le modèle élaboré pour les fibres et le sucre permet une très bonne prédiction de ces paramètres, quelles que soient les variétés et les composantes anatomiques. Les coefficients de corrélation liant les valeurs de référence analysées par des méthodes conventionnelles et les prédictions SPIR sont excellents (tableau 1). Les représentations graphiques de ces relations ne concernent ici que la lignine et les sucres (figure n°1), à titre d'exemple, en retenant la meilleure et la moins bonne. Les autres relations sont situées entre ces deux extrêmes.

Tableau 1 : Paramètres descriptifs du modèle de prédiction de la qualité de la biomasse à partir des mesures SPIR. N : nombre d'individus utilisés. Moyenne : moyenne de la population. SD : écart-type de la population. SEC : écart type résiduel du modèle. R² : coefficient de détermination. SECV : écart type résiduel de la validation croisée.

| Paramètre | N | Moyenne | SD | SEC | R ² | SECV |
|--------------------|-----|---------|-------|------|----------------|------|
| Matières minérales | 518 | 4.73 | 3.02 | 0.55 | 0.96 | 0.76 |
| Hémi-Celluloses | 483 | 24.37 | 6.45 | 1.1 | 0.97 | 1.45 |
| Cellulose | 483 | 33.68 | 7.40 | 1.09 | 0.98 | 1.41 |
| Lignine | 478 | 7.01 | 2.50 | 0.52 | 0.96 | 0.72 |
| Sucres | 266 | 25.81 | 15.57 | 1.15 | 1.00 | 2.33 |

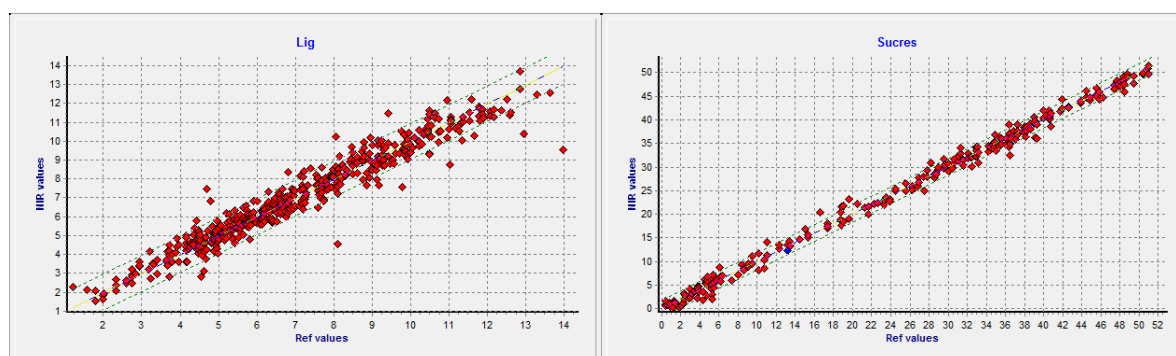


Figure 1 : Relations entre les valeurs prédites par le modèle (en ordonnée) et les valeurs de référence (en abscisse) à partir des échantillons de différentes composantes anatomiques, de plusieurs variétés et âges de cannes combustibles (259 échantillons) et de 280 échantillons d'autres biomasses végétales; exemple de la lignine et des sucres.

Pouvoir calorifique (PCI et PCS)

La détermination du PCS des valeurs de référence a été réalisée par combustion directe grâce à un calorimètre selon la méthode conventionnelle. Le PCI est alors généralement calculé à partir du PCS selon la formule suivante : $PCI = PCS - (212.2 \times H)$ avec H = teneur en hydrogène en % (la valeur de H est par exemple de 6 pour le bois).

La teneur en hydrogène pour le matériel végétal étudié dans le programme a pu être estimée, avec une bonne précision, à partir de sa teneur en matières minérales.

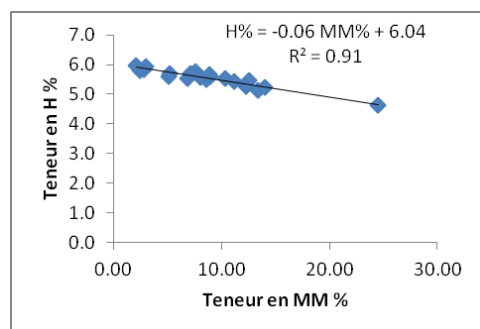


Figure 2. Relation entre la teneur en matières minérales (MM en % de la matière sèche), en abscisse, et la teneur en hydrogène, en ordonnée.

La relation expérimentale obtenue (figure 2), en utilisant des biomasses variées (tiges de canne, feuilles vertes de canne, feuilles sèches de canne, amarres de canne, cannes entières, tiges de sorgho et feuilles de sorgho), montre que la teneur en hydrogène (H) est liée à la teneur en matières minérales (MM) mesurée. Il a donc été possible, en utilisant cette relation empirique mais bonne, de retenir une valeur de H propre à chaque échantillon mesuré, dépendante de sa teneur en matières minérales. Ceci est plus précis et rigoureux que de prendre, comme c'est l'usage courant, une valeur fixe de 5.8 ou 6 %.

La prédiction du PCS à partir des mesures SPIR est tout à fait satisfaisante (tableau 1 et figure 3). En particulier, la relation est très proche de la bissectrice, donc sans erreur systématique, malgré la faible gamme de variation, entre 16000 et 19000 joules par gramme. Ces résultats ont été obtenus en analysant de la biomasse de canne à sucre contenant des fibres, des sucres (au moins pour les tiges) mais aussi, en plus faibles quantités, des matières minérales non combustibles, et d'autres molécules (protéines).

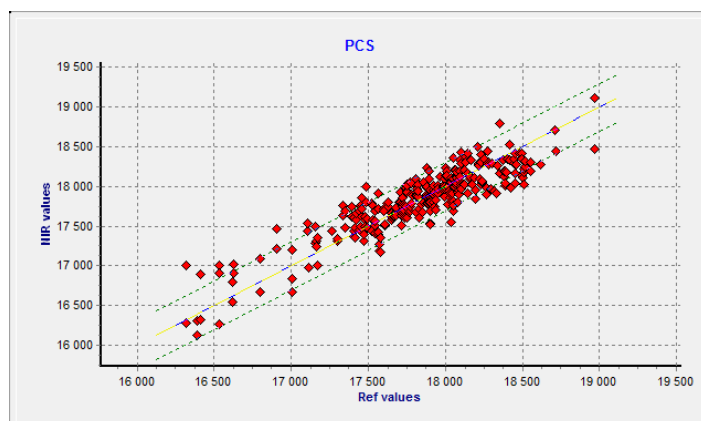


Figure n° 3: Relations entre les valeurs de PCS prédites par le modèle (en ordonnée) en j/g de matière sèche des organes testés et les valeurs de référence (en abscisse), obtenues par la méthode conventionnelle (calorimètre).

Ces prédictions sont donc valables pour les différentes composantes anatomiques du matériel végétal testé dans le programme REBECCA et seront possibles pour d'autres biomasses tant que le matériel biologique prédit reste en cohérence avec celui utilisé pour créer les modèles. Dans le cas contraire, une mise à jour avec de nouveaux échantillons analysés par les méthodes de référence pourrait être nécessaire.

Le modèle de prédiction a été opérationnel à partir de février 2012, après son installation dans le spectromètre proche infrarouge du programme. Il a été utilisé au cours du dernier semestre du programme pour estimer la qualité de la biomasse obtenue sur les 18 variétés de trois essais statistiques mis en place à partir de décembre 2010 et les premiers résultats obtenus dans les essais agronomiques. Les résultats de ces prédictions figurent dans les parties résultats de ces essais, après la présentation des résultats relatifs à la biomasse et son taux de matière sèche.

1.1.3 Conclusions partielles

Les teneurs en fibres, en sucres, les PCI et PCS du matériel végétal du programme peuvent maintenant être estimées localement, facilement, et avec une précision satisfaisante, à partir des seules mesures avec l'analyseur de spectrométrie dans le proche infrarouge.

1.2 Evaluation et sélection variétale

1.2.1 Dispositifs d'étude et conditions climatiques

Le Cirad Guadeloupe dispose, pour des études génétiques, d'une importante collection de variétés de canne à sucre et assimilées. Dans cette collection, 25 cultivars de canne à sucre *Saccharum officinarum*, deux du genre *Erianthus* et un du genre *Spontaneum* ont été identifiés en fonction de critères visuels et de leur origine génétique.

Introduction des variétés sur le site en dispositifs non statistiques pour multiplication et première évaluation

Ces 28 cultivars ont été introduits en 2009 sur le site d'étude du programme REBECCA dans le sud de la Guadeloupe (lat: 16°03' N, long : 61°34' W, alt : 100 m). Ils ont été plantés en parcelles d'observation sans répétition, à deux dates (photo 2).



Photo 2 Dispositif initial d'introduction et de multiplication des 28 variétés de la collection CIRAD. En haut à gauche dispositif V1, 6 parcelles implantées début 2009 (vue partielle). En bas, dispositif V2, 22 parcelles, implantées en mars 2009. En haut à droite: multiplication de 5 variétés, en vue de la phase 2 (vue partielle).

Une première coupe a eu lieu pour permettre des tests en première repousse, plus représentative des performances réelles. Sur la base des mesures (biomasse sèche), sur des cannes âgées de 8 mois en novembre 2010 et en avril 2011, en repousse, 10 cultivars ont été retenus pour étude en dispositifs statistiques.

Parallèlement, le Cirad a importé 6 variétés de canne « mixte » (*multipurpose*) du WICBS de Barbade. Ces variétés ont été mises en quarantaine pendant 2 ans au Cirad à Montpellier avant leur introduction en Guadeloupe début avril 2010 (photo 3A). Elles ont été multipliées dans la collection du Cirad pour disposer d'un stock de boutures suffisant pour implanter un essai statistique (photo 3B). Elles ont été disponibles en avril 2011 pour introduction et tests au Fromager.

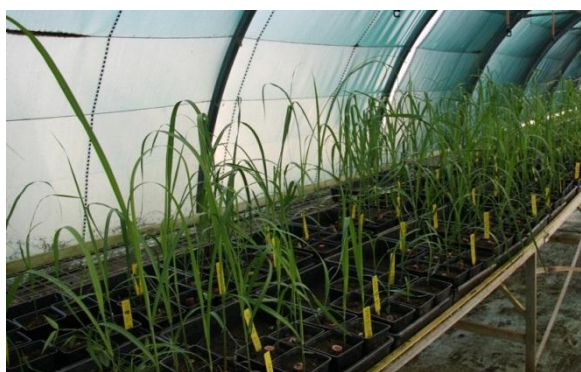


Photo 3 A gauche : Mai 2010, vue des 6 variétés WI de La Barbade venant d'être introduites au Cirad Guadeloupe après 2 ans de quarantaine au Cirad Montpellier, sous forme de boutures de 1 nœud en observation avant implantation dans la collection. A droite: une des variétés (WI79 460) en décembre 2010 dans la collection Cirad

Dispositifs statistiques d'évaluation variétale

Trois dispositifs expérimentaux, plantés entre début janvier et mai 2011, visent à évaluer, en première année de plantation, les 10 cultivars issus des dispositifs non statistiques (tableau 1) et les 6 variétés du WICBS. Chaque dispositif comprend trois répétitions en blocs de Fischer et inclut un témoin commun, la variété R579, performante dans la zone d'étude. La canne a été cultivée en rangs espacés de 1,6 mètre.

Le premier essai (V3) met en comparaison 6 variétés sélectionnées parmi celles bouturables dès décembre 2010 (issues du dispositif V2). Dans cet essai, la variété R570 a été intégrée comme second témoin. Les 6 variétés issues de Barbade ont été testées dans le deuxième essai (V4) planté en avril 2011. Le troisième essai (V5), planté en mai, a permis la comparaison de 4 cultivars de canne à sucre de la collection du Cirad en Guadeloupe, dont les boutures ont été disponibles plus tardivement (issues du dispositif V1). En fin de phase 1, les trois essais sont en repousse 1, après une première récolte (photo 4).

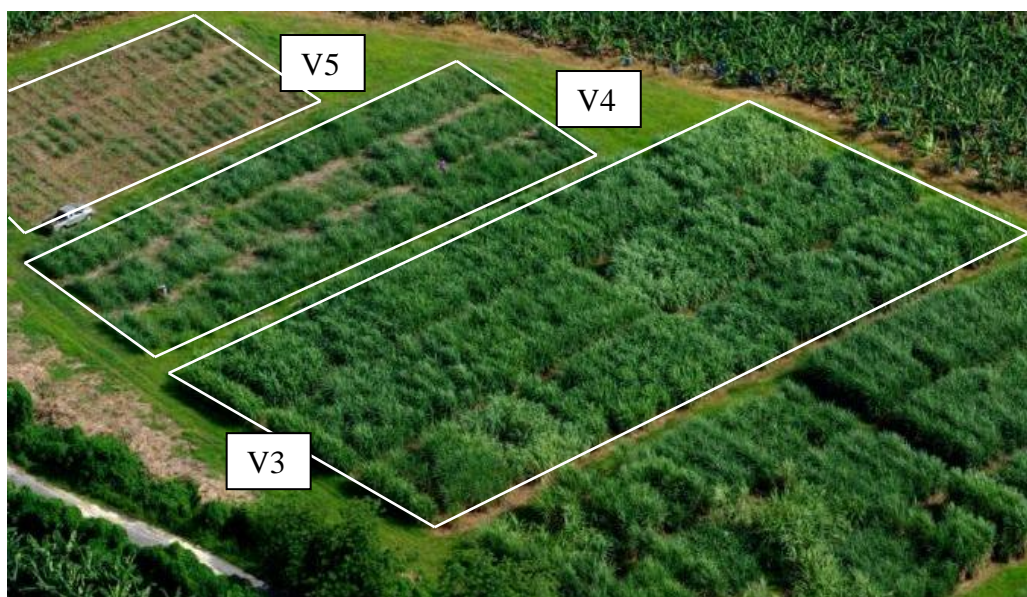


Photo n°4 Dispositif expérimental variétal avec les essais le 1 juin 2012. Essai V3 en repousse depuis janvier 2012, V4 en repousse depuis mi-avril, V5 en repousse depuis début mai.

Conditions environnementales

Le climat du site expérimental est de type tropical humide, avec une pluviosité moyenne de 2 500 à 3 000 mm par an. Pendant les deux ans de l'étude, les conditions climatiques ont été représentatives du climat local (figures 4 et 5).

La pluviosité pendant la période de culture des essais V3, V4 et V5 a été respectivement de 3 450, 2 900 et 2 940 mm. Le 24 novembre 2011, il a plu 93 mm en 24 h, dont 75 mm en moins de trois heures. Cette averse venant sur un sol en partie asséché a entraîné une saturation avec passage du sol à l'état boueux dans l'horizon de surface. Ceci a provoqué une verse importante sur les essais V4 et V5 avec déracinement de certains pieds. Il y a ensuite eu 170 mm de pluie en 3 jours, entre le 27 et le 29 novembre, ce qui a renforcé le phénomène.

La température journalière moyenne établie sur l'année a été de 25 C° environ, avec peu de variations au cours de l'année, mais une température un peu plus fraîche entre janvier et mars (figure 5).

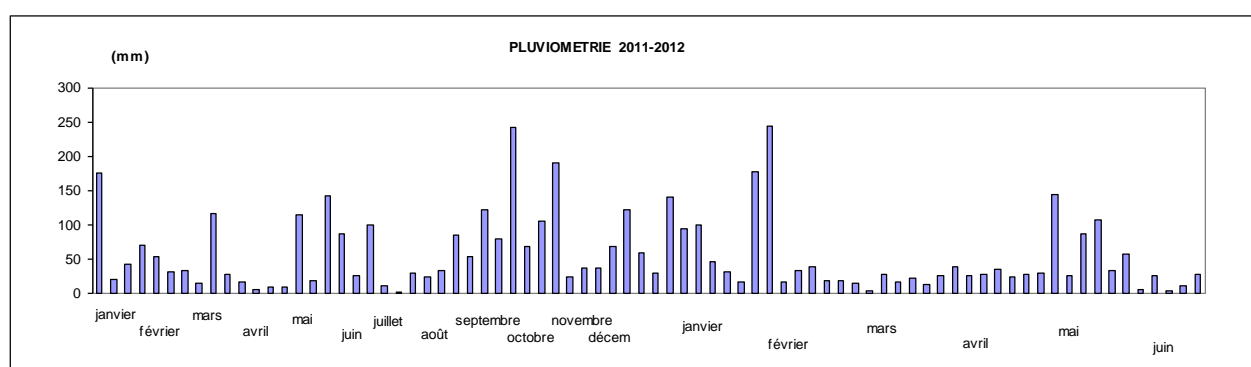


Figure 4 Pluviosité, en mm par semaine, entre le 1 janvier 2011 (levée du premier essai statistique) et le 30 juin 2012 (fin de la phase 1) sur le site du Fromager

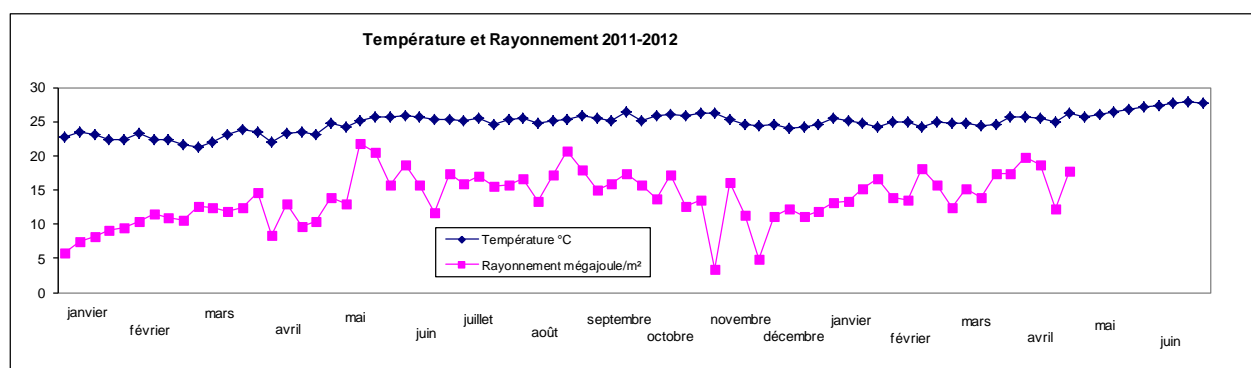


Figure 5 Température (°C) et rayonnement solaire (MJ/m²) journaliers moyens par semaine entre le 1 janvier 2011 (levée du premier essai statistique) et le 30 juin 2012 (fin de la phase 1). Températures mesurées sur le site du Fromager et rayonnement global de la station Cirad de Capesterre Neuf-Château (ND en mai et juin 2012).

Le sol du site, représentatif de la zone, est de type andosol (MO : 4.5%, pH eau : 5.5, teneur en azote total 2 à 3 mg/kg). La fertilisation a été celle préconisée pour la canne à sucre dans la région au début de l'étude (N, P et K, 88, 88 et 260 kg/ha respectivement), de même que la méthode de lutte contre les mauvaises herbes, principalement chimique.

Mesures et modélisation



Photo 5 Pesée au champ d'une des composantes du rendement les tiges usinables

Dans les trois dispositifs, des mesures de biomasse ont été effectuées (photo 5) à l'âge de 8 et de 12 mois sur les 4 parties de la plante destinées à une utilisation comme combustible : tiges usinables, feuilles vertes et feuilles sèches attachées à ces tiges, amarres (sommets des tiges et feuilles attachées). Des mesures ont été faites à 8 et 12 mois pour évaluer les biomasses humides et sèches. Le séchage (à 60°C pendant 48 h, puis à 80°C jusqu'à poids constant) a été effectué sur un échantillon représentatif. Après broyage, chaque partie de la plante a été analysée avec la technologie de Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR).

Un modèle de prédiction du pouvoir calorifique inférieur (PCI) de la biomasse des variétés étudiées a été élaboré à partir de spectres SPIR et d'environ 200 déterminations de PCI de référence, grâce à un calorimètre, suivant la méthode conventionnelle (ISO 9831, 1998).

Les feuilles tombées au sol avant la récolte constituent la seule partie de la plante (en dehors des touffes et des racines) non utilisée comme combustible. Leur biomasse a été évaluée sur les essais V4 et V5 grâce à des filets posés au sol avant la chute des feuilles.

Variétés testées

Parmi les 34 variétés testées, 18 n'ont pas été retenues suite aux premiers tests de biomasse dans le dispositif non statistique, car leur biomasse sèche était inférieure de plus de 30%, aux moins bonnes variétés retenues. Ce sont :

B90246, B70462, BBZ8283, FR99349, B86643, FR99119, BR710048, PR671070, BNxSES3, B73438, WI830705, WI820778, BJ82156, B880780, B80333, B73438, FR870189, MOENTAL. Les noms des 16 variétés testées en essais statistiques figurent dans le tableau n°2.

Les boutures des deux variétés utilisées comme témoin local, largement cultivées à la Guadeloupe, proviennent du CTCS (R570) ou de la ferme de Bologne (R579).

Tableau n°2. Nom et origine des 16 variétés testées en essais statistiques et des 2 témoins. Tous les cultivars sont des cannes à sucre de type commercial, sauf la *NG28007*, du genre *Erianthus*

| Nom essai | Nom variétés | Pays d'origine |
|----------------|--------------|----------------------------|
| V3 | F176 | Formose |
| | FR90925 | France/Guadeloupe |
| | VMC86550 | Philippines |
| | WI870603 | Barbade |
| | TC8 | Malaisie |
| | NG28007 | Nouvelle-Guinée |
| V4 | WI78402 | Barbade |
| | WI79460 | Barbade |
| | WI79461 | Barbade |
| | WI80542 | Barbade |
| | WI86015 | Barbade |
| | WI81456 | Barbade |
| V5 | BBZ92076 | Barbade & Belize |
| | BR62002 | Barbade & Rép. Dominicaine |
| | B79049 | Barbade |
| | FR862027 | France/Guadeloupe |
| Témoins locaux | R579 | France/La Réunion |
| | R570 | France/La Réunion |

1.2.2 Résultats obtenus sur les 16 variétés testées en essais statistiques

Mesures et observations en début de cycle

Des mesures non destructives, de vigueur et de densité à la levée, de vitesse de croissance, de verse et de floraison, ont été faites en cours de cycle avant les premières mesures destructives (biomasses) à l'âge de 8 mois. Il a été noté des différences marquées de vigueur en début de cycle. Elles n'ont pas été reportées ici, remplacées par quelques photos (photos 6, 7, 8). Les écarts observés avant 6 mois ne sont pas forcément les mêmes que ceux observés plus tardivement.



Photo 6. Essai V4 le 7 juin 2011 (50 JAP). Au premier plan la variété WI79461, en début de tallage, la plus vigoureuse à la levée entourée de variétés moins performantes.



Photo 7. Essai V3 début juin 2011 (6 mois). Détail de l'essai avec deux numéros très contrastés sur le plan génétique et phénotype : NG28007 (Erianthus) à gauche et la variété F176 à droite de type sucrier, mais à grande vigueur en début de cycle.



Photo 8 Essai V 4 variété WI 81456 en novembre 2011 âgée de 8 mois

Biomasse humide mesurée au champ



Photo 9 Essai V3 coupe des cannes âgées de 12 mois

L'évaluation des variétés s'est d'abord faite au champ, en mesurant séparément la biomasse des 4 composantes anatomiques. Ces mesures au champ ont servi, après séchage, à évaluer le rendement en matière sèche et le taux de matière sèche des composantes anatomiques. C'est à partir de cette matière sèche qu'ont été évalués le pouvoir calorifique (kJ/g) et le rendement énergétique (MJ/m²) de biomasse sèche. Ce rendement énergétique sera l'indicateur principal de performance et donc de sélection des variétés. Toutefois, les coûts de récolte et de transport sont calculés en considérant la matière fraîche telle qu'elle est au champ et le prix payé à l'agriculteur se fera en évaluant, dans un premier stade, la biomasse fraîche qu'il présentera à l'acheteur. Les rendements en matière fraîche figurent dans le tableau 3, par composante biomassique et pour l'ensemble des parties commercialisables de la plante.

Le rendement des tiges usinables du témoin R579 a été variable d'un essai à l'autre, lié aux conditions climatiques, à des variations de taux d'humidité du produit et aux méthodes de mesure en petites placettes de 6 m² (tableau 3) qui peuvent créer une certaine variabilité aléatoire. Mais ce rendement conventionnel peut être considéré comme excellent dans chaque essai, proche de 150 t/ha dès 8 mois et de 200 t/ha à 12 mois, même si ce type de rendement peut parfois être observé dans la zone, en conditions de culture favorable. Aucune des 16 variétés testées ne dépasse ce rendement en tiges usinables. R579 est donc très bien adaptée à la production sucrière locale. Les tiges usinables constituent la plus grande partie de la biomasse totale ; il est donc logique que le rendement total en biomasse fraîche de cette variété reste élevé (tableau 3).

Tableau 3 Biomasses humides mesurées au champ sur des cannes âgées de 8 et 12 mois sur les essais V3, V4 et V5. Les variétés R579 et R570 sont les témoins locaux. Les chiffres d'un même essai suivis d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| Essai | Variété | Tiges | | Amarres | | F.vertes | | F.sèches | | Total | |
|-------|----------|-------|-------|---------|------|----------|--------|----------|--------|-------|-------|
| | | 8 m | 12 m | 8 m | 12 m | 8 m | 12 m | 8 m | 12 m | 8 m | 12 m |
| V3 | R579 | 124a | 207a | 28a | 32a | 13a | 10,7a | 3,1b | 5,6a | 167a | 255a |
| | R570 | 118a | 210a | 29a | 30a | 15a | 10,3a | 3,7b | 10,8a | 166a | 261a |
| | F176 | 107a | 167ab | 28a | 26a | 12a | 8,2a | 3,4b | 6,7a | 151a | 208ab |
| | FR90925 | 117a | 160ab | 34a | 30a | 17a | 9,8a | 4,2b | 8,1a | 172a | 207ab |
| | VMC86550 | 118a | 177ab | 28a | 18a | 13a | 8,4a | 3,3b | 9,2a | 163a | 212ab |
| | WI870603 | 78a | 138b | 30a | 29a | 11a | 7,8a | 2,7b | 7,5a | 122a | 183ab |
| | NG28007 | 73a | 91c | 48a | 32a | 14a | 9,4a | 2,5b | 7,9a | 137a | 140b |
| | TC8 | 141a | 181ab | 36a | 28a | 12a | 9,4a | 6,4a | 8,5a | 195a | 227ab |
| V4 | R579 | 146a | 137a | 37ab | 23a | 12a | 9,3a | 6,2ab | 3,8b | 201a | 173a |
| | WI78402 | 81b | 149a | 31ab | 37a | 8,4abc | 12,8a | 5,9ab | 12,9a | 126b | 211a |
| | WI79460 | 117a | 168a | 42a | 31a | 11,6a | 9,7a | 7,5a | 13,9a | 178a | 222a |
| | WI79461 | 137a | 159a | 39ab | 28a | 8,8abc | 6,1a | 5,9ab | 12,6a | 191a | 206a |
| | WI80542 | 80b | 173a | 14b | 33a | 4,1c | 11a | 5,9ab | 10,6ab | 104b | 228a |
| | WI86015 | 81b | 134a | 21ab | 32a | 5,7bc | 6,9a | 4,3b | 8,2ab | 113b | 181a |
| | WI81456 | 137a | 161a | 42a | 26a | 10,2ab | 6,5a | 5,4ab | 10,6ab | 194a | 204a |
| V5 | R579 | 149a | 153a | 20a | 32a | 13,3a | 6,7b | 4b | 5,4a | 186a | 197a |
| | BBZ92076 | 129a | 136a | 34a | 40a | 12,4a | 8,7b | 8,5a | 10,8ab | 183a | 196a |
| | BR62002 | 123a | 148a | 23a | 38a | 14,6a | 18a | 3,7b | 4,7b | 165a | 208a |
| | B79049 | 113a | 113a | 21a | 28a | 7,8a | 8,7b | 5,6ab | 6,4b | 148a | 156a |
| | FR862027 | 72a | 123a | 35a | 52a | 9,1a | 11,9ab | 5,9ab | 14,3a | 122a | 202a |

Rendement en biomasse sèche

Chez toutes les variétés testées, les biomasses fraîches et sèches totales se sont accrues notablement entre 8 et 12 mois (tableau 3, figures 6, 7, 8).

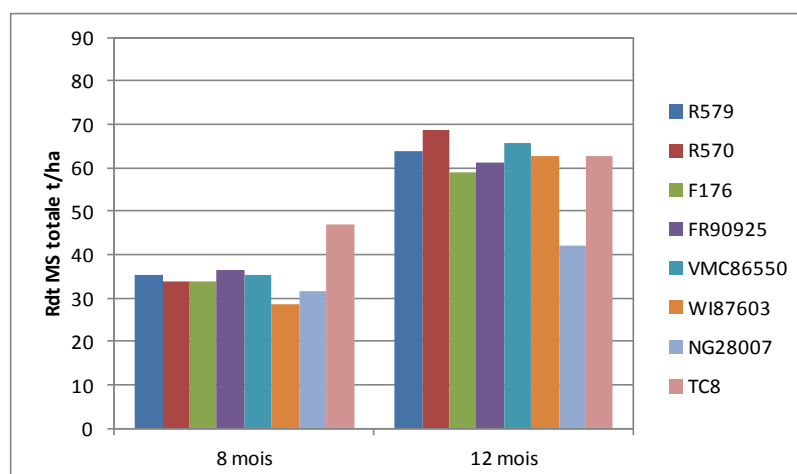


Figure 6. Essai V3 : biomasses sèches totales (t/ha) des cannes à sucre âgées de 8 et de 12 mois.

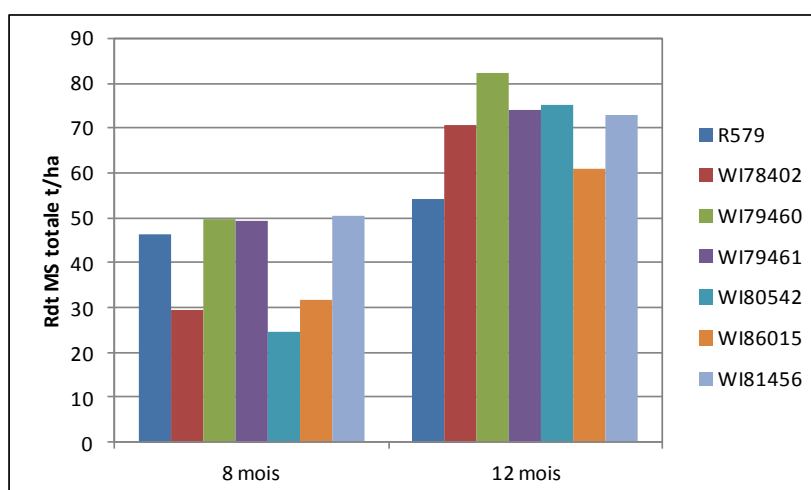


Figure 7. Essai V4 : biomasses sèches totales (t/ha) des cannes à sucres âgées de 8 et de 12 mois.

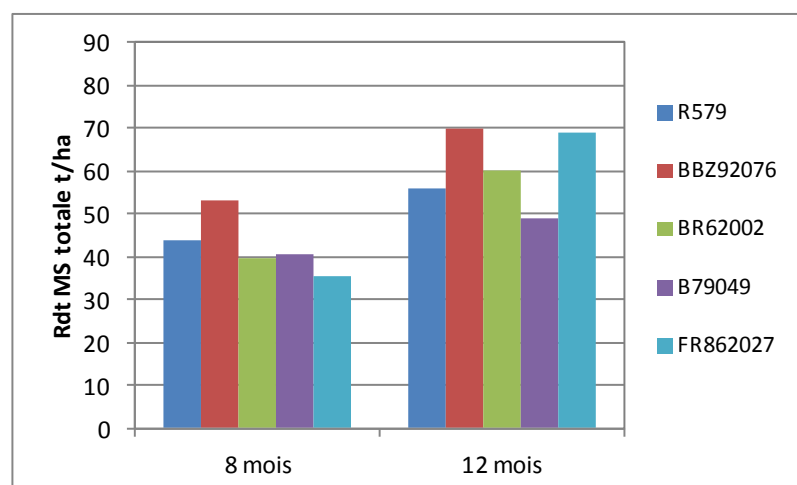


Figure 8. Essai V5 : biomasses sèches totales (t/ha) des cannes à sucres âgées de 8 et de 12 mois.

Pour certaines variétés testées, il y a eu une légère accélération entre 8 et 12 mois. Mais la récolte de la canne combustible devra s'échelonner sur presque toute l'année et l'agriculteur devra probablement la couper, en partie, avant 12 mois. Les variétés retenues devront être performantes entre 8 et 12 mois. C'est pourquoi, les valeurs à 8 et à 12 mois ne sont pas détaillées ici, de même que l'analyse de l'évolution de la biomasse entre 8 et 12 mois n'a pas été faite. Seules les moyennes des résultats obtenus sur les mêmes parcelles à 8 et à 12 mois sont présentées.

Tableau 4. Moyenne des biomasses sèches sur des cannes âgées de 8 et 12 mois sur les essais V3, V4 et V5. Les variétés R579 et R570 sont les témoins locaux. Les chiffres d'un même essai suivis d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05

| Rendements en tonnes/ha de matière sèche | | | | | | |
|--|----------|-------|---------|-----------|-----------|-------|
| Essai | Variété | Tiges | Amarres | F. vertes | F. sèches | Total |
| V3 | R579 | 36a | 6,1a | 3,0a | 4,3a | 50a |
| | R570 | 35a | 5,8a | 3,2a | 7,2a | 51a |
| | F176 | 34ab | 5,0a | 2,6a | 5,1a | 46a |
| | FR90925 | 32ab | 7,2a | 3,6a | 6,2a | 49a |
| | VMC86550 | 36a | 5,0a | 3,1a | 6,3a | 50a |
| | WI870603 | 31ab | 7,2a | 2,6a | 5,1a | 46a |
| | NG28007 | 21b | 7,8a | 3,2a | 5,2a | 37a |
| | TC8 | 38a | 6,4a | 2,7a | 7,4a | 55a |
| V4 | R579 | 36a | 6,2a | 2,7a | 4,9b | 50a |
| | WI78402 | 31a | 7,1a | 2,9a | 9,4ab | 50a |
| | WI79460 | 43a | 8,7a | 3,0a | 10,5a | 66a |
| | WI79461 | 43a | 7,5a | 2,0a | 9,3ab | 62a |
| | WI80542 | 35a | 5,0a | 2,2a | 8,3ab | 50a |
| | WI86015 | 32a | 6,8a | 2,1a | 6,1ab | 47a |
| | WI81456 | 43a | 7,8a | 2,6a | 7,8ab | 61a |
| V5 | R579 | 37.1a | 5,3b | 2,8b | 4,7b | 50a |
| | BBZ92076 | 39.8a | 9,0ab | 3,1b | 9,7a | 62a |
| | BR62002 | 34.2a | 6,5b | 4,4a | 4,6b | 50a |
| | B79049 | 30.6a | 5,8b | 2,3b | 6,0b | 45a |
| | FR862027 | 28.4a | 10,4a | 3,4ab | 10,1a | 52a |

Comme déjà observé avec la matière fraîche (tableau 3), le rendement du témoin R579 a été excellent dans chaque essai. Il se confirme donc que, même en considérant la matière sèche totale, la variété R579 reste très performante. Toutefois, plusieurs variétés ont des biomasses totales sèches supérieures (tableau 4).

Répartition de la biomasse dans la plante

Les biomasses sèches de chaque variété des essais V3 et V4 sont reportées dans les figures 9 et 10. Les résultats de répartition de la biomasse obtenus dans le troisième essai V5 sont convergents et ne sont pas présentés. La biomasse totale est principalement constituée de tiges avec peu de variabilité d'une variété à l'autre. C'est la variété WI 78402 qui a le plus faible pourcentage de tiges usinables par rapport à la biomasse sèche totale. C'est le pourcentage de feuilles sèches qui apparaît le plus fluctuant d'une variété à l'autre, avec en particulier, une faible valeur sur le témoin R579. Cette variété est en effet réputée pour perdre ses feuilles en sénescence.

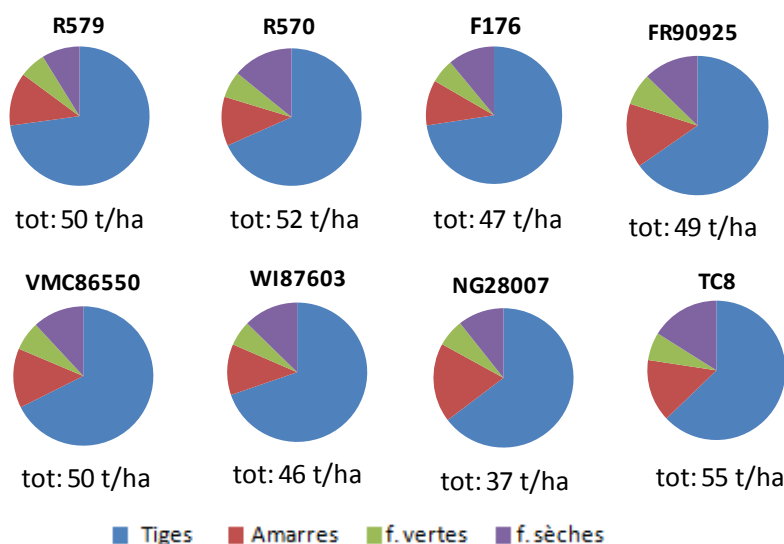


Figure 9 Essai V3. Matière sèche totale des parties aériennes, moyennes des résultats à 8 et 12 mois (chiffres en t/ha) et répartition, en pourcentage, des différents compartiments mesurés: tiges, amarres (parties sommitales de la plante), feuilles vertes et sèches.

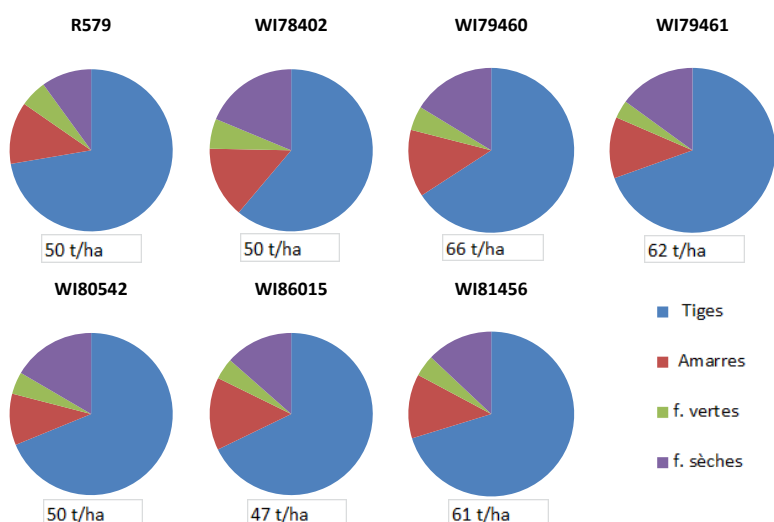


Figure 10 Essai V4. Matière sèche totale des parties aériennes, moyennes des résultats à 8 et 12 mois (chiffres en t/ha) et répartition, en pourcentage, des différents compartiments mesurés: tiges, amarres (parties sommitales de la plante), feuilles vertes et sèches.

1.2.3 Qualité de la biomasse fibres, humidité, pouvoir calorifique

Caractérisation de la biomasse produite: teneurs en fibres, sucres et matières minérales de la matière sèche des différentes composantes anatomiques

Les teneurs en fibres, en sucres et en matières minérales des quatre composantes anatomiques des parties aériennes à 8 et à 12 mois, issues de l'analyse avec le spectrophotomètre figurent pour l'essai V3 dans les tableaux 5 et 6. Les mêmes résultats concernant les essais V4 et V5, figurent en annexe (Chopart 2012, NS n° 6).

Tableau 5 Essai V3. Résultats à 8 mois des teneurs en fibres des parties aériennes en % de matière sèche.

| Variété | R579 | R570 | F176 | FR90925 | VMC86550 | WI860603 | NG28007 | TC8 |
|-----------------------|------|------|------|---------|----------|----------|---------|------|
| Hémicellulose Amarres | 31.6 | 32.0 | 31.3 | 31.8 | 30.5 | 32.7 | 32.8 | 31.9 |
| F.sèches | 31.3 | 32.1 | 31.4 | 31.1 | 31.7 | 31.9 | 32.4 | 32.0 |
| F.vertes | 32.6 | 32.3 | 32.1 | 32.1 | 31.9 | 31.4 | 32.9 | 32.7 |
| Tiges | 16.6 | 16.0 | 16.5 | 15.6 | 16.4 | 20.3 | 23.0 | 17.1 |
| Cellulose % Amarres | 34.8 | 35.2 | 36.3 | 36.1 | 36.5 | 38.1 | 37.4 | 36.6 |
| F.sèches | 37.7 | 39.1 | 38.1 | 39.8 | 40.1 | 41.9 | 39.7 | 40.9 |
| F.vertes | 36.0 | 37.4 | 36.6 | 37.2 | 37.7 | 39.0 | 37.9 | 37.3 |
| Tiges | 26.1 | 28.9 | 26.6 | 29.1 | 24.7 | 39.5 | 45.9 | 29.8 |
| Lignine % Amarres | 4.8 | 5.4 | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 6.2 | 6.5 | 6.0 |
| F.sèches | 6.7 | 8.0 | 7.9 | 7.6 | 7.6 | 8.8 | 7.6 | 8.2 |
| F.vertes | 5.8 | 6.8 | 6.4 | 6.9 | 6.4 | 7.3 | 7.1 | 6.7 |
| Tiges | 5.8 | 6.6 | 6.1 | 6.5 | 4.9 | 8.8 | 11.1 | 7.2 |
| Matières Amarres | 9.0 | 8.6 | 8.1 | 8.4 | 8.3 | 8.5 | 9.1 | 8.7 |
| Minérales % F.sèches | 12.2 | 10.5 | 10.1 | 8.7 | 10.1 | 8.1 | 10.1 | 9.5 |
| F.vertes | 9.9 | 8.5 | 9.0 | 8.1 | 8.3 | 9.0 | 8.8 | 8.8 |
| Tiges | 3.7 | 3.9 | 3.5 | 3.8 | 3.4 | 4.8 | 6.1 | 3.0 |
| Sucres % Amarres | 6.9 | 4.9 | 6.0 | 5.6 | 7.8 | 2.3 | 1.0 | 4.1 |
| F.sèches | -0.2 | -1.1 | 0.7 | 1.0 | -0.8 | 0.0 | -1.9 | -1.2 |
| F.vertes | 3.9 | 2.2 | 3.5 | 4.2 | 4.7 | 0.8 | 1.1 | 2.6 |
| Tiges | 33.2 | 31.5 | 33.9 | 30.0 | 36.1 | 14.5 | 3.5 | 28.7 |

Tableau 6. Essai V3. Résultats à 12 mois des teneurs en fibres des parties aériennes en % de matière sèche.

| Variété | R579 | R570 | F176 | FR90925 | VMC86550 | WI860603 | NG28007 | TC8 |
|-----------------------|------|------|------|---------|----------|----------|---------|------|
| Hémicellulose Amarres | 31.8 | 31.3 | 30.4 | 30.7 | 30.2 | 31.4 | 32.2 | 30.3 |
| % F.sèches | 32.2 | 30.8 | 32.7 | 30.7 | 31.6 | 31.3 | 31.5 | 33.2 |
| F.vertes | 31.4 | 31.5 | 32.0 | 30.8 | 31.1 | 31.8 | 32.0 | 33.0 |
| Tiges | 15.1 | 13.6 | 14.6 | 14.2 | 14.8 | 16.0 | 21.5 | 14.9 |
| Cellulose % Amarres | 37.1 | 37.4 | 37.7 | 38.9 | 39.5 | 39.4 | 40.1 | 39.6 |
| F.sèches | 38.7 | 39.9 | 40.1 | 40.5 | 41.4 | 41.9 | 41.6 | 41.0 |
| F.vertes | 35.7 | 38.5 | 37.1 | 36.6 | 36.9 | 38.7 | 38.4 | 36.7 |
| Tiges | 24.0 | 26.9 | 25.2 | 27.9 | 23.6 | 35.0 | 45.8 | 28.9 |
| Lignine % Amarres | 5.2 | 6.0 | 6.0 | 6.2 | 6.3 | 6.6 | 6.5 | 6.6 |
| F.sèches | 6.7 | 8.6 | 8.2 | 9.3 | 7.7 | 8.9 | 8.8 | 8.5 |
| F.vertes | 5.8 | 6.7 | 6.3 | 6.4 | 6.3 | 6.8 | 6.9 | 6.3 |
| Tiges | 5.8 | 6.3 | 6.4 | 6.7 | 5.4 | 8.5 | 11.5 | 7.5 |
| Matières Amarres | 8.8 | 7.8 | 7.7 | 7.4 | 7.6 | 7.0 | 8.4 | 8.4 |
| Minérales % F.sèches | 9.3 | 7.9 | 8.4 | 9.0 | 8.3 | 7.9 | 9.5 | 8.7 |
| F.vertes | 9.6 | 8.0 | 8.4 | 8.2 | 9.0 | 8.7 | 9.4 | 8.9 |
| Tiges | 2.8 | 3.6 | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 3.4 | 6.3 | 3.0 |
| Sucres % Amarres | 3.5 | 5.7 | 5.9 | 3.5 | 4.9 | 4.0 | 0.5 | 1.2 |
| F.sèches | 1.0 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 1.2 | 0.1 | -0.4 | -1.6 |
| F.vertes | 4.7 | 2.9 | 3.6 | 4.7 | 4.6 | 2.1 | 1.5 | 2.4 |
| Tiges | 42.9 | 41.2 | 40.7 | 41.8 | 47.9 | 29.2 | 5.7 | 38.5 |

Dans l'essai V3, la variété NG 28 007, du genre Erianthus, a des caractéristiques assez différentes de celles des autres variétés testées. En effet, elle ne contient pas ou très peu de sucres. Ce constituant de la plante et des tiges en particulier est remplacé par une plus haute teneur en fibres. Toutes les autres variétés ont des teneurs en fibres et en matières minérales peu différentes d'une variété à l'autre. En revanche, les fluctuations de teneurs en sucres dans les tiges sont un peu plus grandes. Quelques variétés ont une teneur en sucres dans les tiges inférieure aux autres: il s'agit de WI860603 (essai V3), WI 78 402, WI 81 456 et WI 79 460 (essai V4), B79049 (essai V5). Il faudra vérifier si ces observations se confirment à l'âge normal de la coupe de la canne à sucre (12 mois). La teneur en sucre des feuilles sèches de toutes les variétés est presque nulle. Elle fluctue autour de 0 et peut donc avoir une valeur négative. Ce n'est pas une erreur mais une conséquence du mode de prédiction et d'une incertitude non nulle sur les valeurs obtenues.

Les feuilles et les amarres (parties sommitales de la tige avec les feuilles vertes attachées) sont constituées de cellulose et d'hémicellulose en proportions comparables de 30 à 40 %, la teneur en lignine est plus faible.

Humidité et pouvoir calorifique par unité de poids sec des composantes anatomiques et par unité de surface cultivée

Le taux de matière sèche des tiges et des feuilles vertes est un critère de sélection important en particulier pour la combustion. Les variétés testées, en particulier les WI, ont souvent une humidité inférieure à celle du témoin (tableau 7). Mais le premier critère de sélection est le pouvoir calorifique de la biomasse : pouvoirs calorifiques inférieur (PCI) et supérieur (PCS). Les PCI et PCS sont très liés, seuls les premiers sont présentés ici. Les PCI ont été mesurés sur 4 types de parties aériennes, 18 variétés et 2 stades de végétation. Le PCI de ce jeu de 144 données issues des essais variétaux et exprimé par poids de matière sèche, fluctue faiblement, avec des valeurs moyenne, minimale et maximale respectivement de 16,6, 15,9 et 17,0 kJ/g et un écart-type de 0,2 kJ/g.

Pour sélectionner les meilleures variétés à usage de combustible, le critère le plus utile est le pouvoir calorifique exprimé en Mégajoules produit par unité de surface cultivée (MJ/m²). Le PCI de la matière sèche totale des meilleures variétés de V4 se situe entre 85 et 90 MJ/m² à 8 mois et entre 120 et 140 MJ/m² à 12 mois. En faisant la moyenne des résultats à 8 et à 12 mois, ce rendement calorifique dépasse 100 MJ/m² (tableau 7).

Tableau 7. Taux de matière sèche des différentes structures de la canne et pouvoir calorifique inférieur de la plante entière sèche par mètre carré de surface, moyenne des résultats obtenus à 8 et à 12 mois. Les chiffres d'un même essai suivis d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| Essai | Variété | % de matière sèche | | | PCI MJ/m ² |
|-------|----------|--------------------|---------|-----------|-----------------------|
| | | Tiges | Amarres | F. vertes | Plante entière |
| V3 | R579 | 21bc | 20b | 26a | 82,0a |
| | R570 | 20c | 20b | 25a | 85,2a |
| | F176 | 24b | 18b | 26a | 76,9a |
| | FR90925 | 22bc | 23ab | 28a | 81,0a |
| | VMC86550 | 24b | 23ab | 29a | 83,6a |
| | WI870603 | 27a | 25a | 28a | 76,5a |
| | NG28007 | 24b | 20b | 28a | 61,5a |
| | TC8 | 24b | 20b | 26a | 91,9a |
| V4 | R579 | 26ab | 21ab | 26a | 82,5a |
| | WI78402 | 25ab | 22ab | 28a | 83,2a |
| | WI79460 | 30a | 24a | 30a | 110,3a |
| | WI79461 | 28bc | 23ab | 29a | 103,3a |
| | WI80542 | 25a | 20a | 28a | 83,5a |
| | WI86015 | 29bc | 25b | 31a | 78,2a |
| | WI81456 | 29bc | 23ab | 32a | 103,9a |
| V5 | R579 | 25b | 21a | 28b | 82,3a |
| | BBZ92076 | 30a | 24a | 30b | 103,1a |
| | BR62002 | 25b | 21a | 27b | 82,0a |
| | B79049 | 27ab | 23a | 28b | 74,2a |
| | FR862027 | 28a | 23a | 32a | 87,3a |

Les résultats sont aussi exprimés en écart par rapport au témoin R579 (figure 11). Du fait de la faible variabilité du PCI par unité de biomasse sèche, le classement des variétés selon leur PCI par unité de surface cultivée est proche de celui obtenu à partir des rendements de biomasse sèche en t/ha. Le rendement du témoin R579 étant élevé, seules deux variétés issues de la collection du

Cirad montrent un PCI supérieur à celui du témoin: TC8 et BBZ92076 (tableau 7, figure 11). Trois variétés importées de Barbade, WI79 461, WI79461 et WI81456, ont un PCI/m² supérieur d'environ 25 % à celui du témoin.

La variété du genre *Erianthus* (NG28007) a eu des performances nettement inférieures à toutes les variétés de canne à sucre testées. Elle ne paraît donc pas concurrentielle dans les conditions locales d'après les indicateurs de biomasse sèche et de rendement énergétique. En fait, dans les premières études en dispositif non statistique, elle avait déjà le moins bon des rendements des variétés retenues. Elle a été mise en dispositif statistique pour créer de la variabilité génétique et pour vérifier ces premiers résultats. Il se trouve, de plus que le comportement de ce matériel végétal et sa conduite agronomique ne sont pas satisfaisants (levée irrégulière, puis très fort tallage et tiges inclinées donc difficiles à récolter). Ce sera donc la première variété éliminée dans cette sélection variétale.

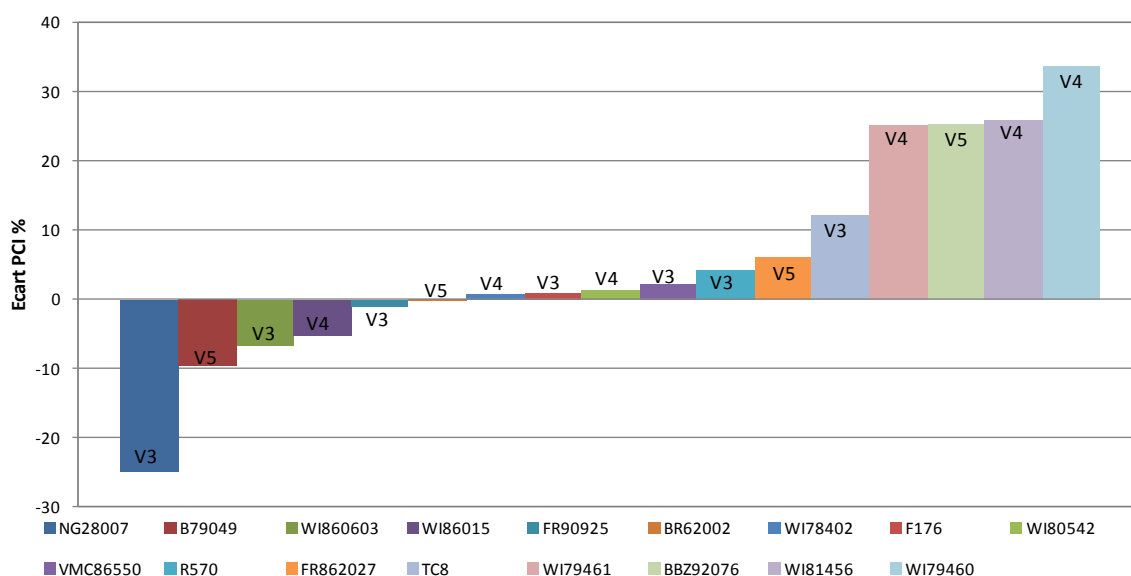


Figure 11. Ecart des valeurs de pouvoir calorifique inférieur (PCI) par unité de surface de culture en % par rapport au PCI du témoin (R579) présent dans chaque essai. Moyenne des résultats obtenus à 8 et 12 mois. Les PCI des témoins sur les essais V3, V4 et V5 sont respectivement : 81.9, 82.5 et 82.3 MJ/m².

1.2.4 Autres critères de sélection et synthèse des résultats

D'autres critères présentent un intérêt dans le cadre de ce programme :

- la sensibilité des variétés à la verse : une sensibilité à la verse des variétés poussant dans un sol souvent très humide est une contrainte.
- la biomasse de feuilles tombées sur le sol au cours de la culture : cette biomasse sera la seule restitution organique au sol. Elle a été mesurée à la récolte sur deux des trois essais.
- la floraison : elle a une influence sur le fonctionnement de la plante, mais c'est ici une information plus qu'un critère de sélection.

Les résultats, en année de plantation, des cinq variétés les plus prometteuses, d'après leur PCI/m², sont dans le tableau 8. Quatre autres variétés ont eu des PCI/m² légèrement inférieurs, mais étaient parmi les meilleures d'après au moins un des autres critères de sélection, en particulier, leur humidité à la récolte et leur verse. Une verse importante été observée sur l'essai V5, lors d'une forte pluie; les variétés FR862027 et WI860603 ont très bien résisté. Le fort épaillage naturel de R579 a été confirmé localement. La variété WI79461 a aussi cette propriété.

Tableau 8. Propriétés et performances des 9 meilleures variétés en année de plantation, entre 8 et 12 mois, suivant plusieurs critères de sélection.

| Essai | Variétés | Principaux critères de sélection (moyenne 8-12 mois) | | Critères de sélection secondaires (à la récolte) | | Information complémentaire |
|-------|------------------|---|--------------------------|---|---|-------------------------------|
| | | PCI/surface (MJ/m ²) | % matière sèche tiges | Verse (de 0 aucune à 3 forte) | Poids sec de feuilles tombées (g/m ²) | Floraison (notée 0 à 3) |
| V3 | <i>R 579</i> | 82,0 | 21 | 1,6 | | 0,0 |
| | TC8 | 91,9 | 25 | 1,8 | Non | 3,0 |
| | WI 860603 | 76,5 | 32 | 0,7 | déterminé | 0,0 |
| | VMC86550 | 83,5 | 28 | 1,1 | | 2,7 |
| V4 | <i>R579</i> | 82,5 | 26 | 1,7 | 216 | 0,0 |
| | WI79460 | 110,3 | 30 | 1,0 | 141 | 2,3 |
| | WI79 461 | 103,3 | 28 | 1,5 | 200 | 2,7 |
| | WI 79456 | 103,9 | 29 | 1,0 | 66 | 0,7 |
| V5 | <i>R579</i> | 82,3 | 25 | 3,0 | 103 | 0,0 |
| | BBZ 92076 | 103,1 | 30 | 2,0 | 61 | 0,0 |
| | FR 862027 | 87,3 | 28 | 0,0 | 50 | 3,0 |
| | BR62002 | 82,0 | 25 | 3,0 | 87 | 0,0 |

1.2.5 Conclusion de la partie sélection variétale

A partir de 35 cultivars de canne appartenant aux genres *Saccharum*, *Erianthus* et *Spontaneum*, 16 ont été retenus pour comparaison en dispositifs statistiques face à la variété témoin R579, particulièrement productive dans les conditions locales.

Malgré un rendement élevé du témoin R579, quelques variétés ont été supérieures sur les critères de rendements en matière sèche totale (66t/ha de matière sèche pour la meilleure variété) et de taux de matière sèche (70% pour la meilleure variété).

Les feuilles vertes et sèches et les amarres des variétés étudiées possèdent des teneurs en fibres proches, avec peu de fluctuation d'une variété de canne à l'autre. Il y a donc une grande stabilité de teneurs en fibres de ces parties de la plante. Seules les tiges, qui contiennent plus ou moins de sucres créent une variabilité significative des constituants du matériau. Il existe également une grande stabilité du pouvoir calorifique exprimé par unité de biomasse sèche, d'une composante anatomique à l'autre et entre 8 et 12 mois avec une valeur moyenne de 16.6 kJ/g de matière sèche. Le rendement énergétique, exprimé en MJ/m² varie donc, essentiellement, avec la variation du rendement en matière sèche de la plante entière. Ce rendement énergétique est ici le principal critère de sélection. Il a atteint 110MJ/m² pour la meilleure variété sur une moyenne de 2 mesures à 8 et à 12 mois. L'écart de rendement énergétique avec le témoin local performant dans la zone atteint ou dépasse 25% chez 4 des variétés testées.

En deux ans, 9 variétés intéressantes pour un usage comme combustible ont été identifiées, en année de plantation. Leurs principales performances et propriétés ont été caractérisées.

Parmi ces 9 variétés, cinq sont particulièrement prometteuses, trois en provenance du WICSBS de Barbade (WI79460, WI79461, WI79456) et deux du CIRAD (TC8 et BBZ92076).

Les résultats, obtenus en année de plantation, doivent être complétés en repousse. Mais ils ont déjà permis de choisir les variétés à tester en phase 2 et de fournir des informations utiles aux économistes, environnementalistes et industriel du programme REBECCA.



Photo 10 Variété WI 79460 en novembre 2011 âgée de 7 mois.



Photo n° 11. Variétés WI 79 461 à 9 mois à gauche et WI 79 460 à 11 mois à droite.



Photo n° 12 Variété BBZ 92076 âgée de 8 mois.

1.3 Etudes agronomiques. Première contribution à la mise au point d'itinéraires techniques de production performants et durables

1.3.1 Effets des dates de plantation et des durées de cycle sur le rendement et la qualité de la biomasse des variétés issues de la collection du CIRAD les plus prometteuses

L'objectif du programme est de produire une quantité optimale de calories/m²/mois pour alimenter une centrale thermique pendant une période de l'année la plus longue possible.

Dans le milieu étudié (Sud Basse-Terre, Guadeloupe), il n'y a pas, a priori, de contraintes dirimantes liées à la température, à l'ensoleillement ou au stress hydrique, mais ces facteurs peuvent néanmoins entraîner une variabilité intra-annuelle. En revanche, il existe une contrainte majeure de forte pluviosité qui limite les jours disponibles pour les opérations culturales et le séchage de la biomasse récoltée.

Les deux premières expérimentations mises en place en juin, août et novembre 2011, visent à contribuer à apporter des premiers éléments de réponse. Elles permettent d'abord de mieux comprendre l'évolution de la production de biomasse en fonction de la date de plantation et de coupe, en utilisant, dans l'immédiat, les pratiques culturales locales. Elles serviront aussi à observer les effets de contraintes agronomiques liées à ces nouvelles pratiques culturales (couverture du sol excès d'eau, dégradations éventuelles du sol).

Ces expérimentations visent à reproduire les pratiques et contraintes habituelles des agriculteurs de la zone sud Basse-Terre. On s'est donc limité, dans cette première étude, à tester des dates de plantations les plus adaptées et les plus courantes, c'est-à-dire la période chaude et humide allant de juin à novembre, soit 5 mois. De même, il n'est pas possible de multiplier les variétés testées. On s'est limité à utiliser 4 variétés parmi les meilleures identifiées.

Dispositifs et méthodes d'études

Un premier essai (Agro 1) comprend deux variétés BR 62002, BBZ92076, qui ont eu les meilleurs rendements sur les essais non statistiques. L'essai est subdivisé en deux sous-essais identiques, excepté la date de plantation : le premier sous-essai a été planté en juin 2011 et le second en novembre. Ces deux dates encadrent la période la plus favorable de plantation. Les mesures de biomasse et les récoltes se font après 8 et à 12 mois de culture.

Un second essai (Agro2) a les mêmes grands objectifs que l'essai Agro1, dont il est complémentaire. Il n'y a qu'une seule date de plantation au milieu de la période de plantation (août). On y teste le comportement agronomique de la meilleure variété identifiée à l'âge de 8 mois dans l'essai V3 (TC8) et une seconde la WI 870603 qui n'a pas la meilleure production mais qui a une morphologie intéressante : faible diamètre des tiges, taux de matière sèche élevé, absence de floraison (tableau 8).

Les deux dispositifs agronomiques ont chacun trois répétitions. Ils sont voisins et sont situés à proximité des dispositifs d'études variétales. En revanche, le précédent cultural est différent. Celui des dispositifs agronomiques est de la canne à sucre, tandis que celui des essais variétaux est une jachère de plusieurs années. Cela place, a priori, des essais agronomiques dans des conditions un peu moins favorables que les essais variétaux.



Photo 13 Essai agronomique 1 en novembre 2011 (à droite plantation de novembre et à gauche celle de juin ; au fond essai V3).

Biomasse et taux de matière sèche

Essai Agro 1 Date de plantation en début de campagne (juin)

Six mois après la plantation, la variété BR 62002 a une production de matière sèche totale nettement supérieure à celle de BBZ92076 (Chopart 2012 Note scient n° 6) mais, deux mois après, les écarts se sont réduits et ne sont plus statistiquement significatifs (tableau 19). Il en est de même à 12 mois. Les taux de matière sèche des tiges de la variété BBZ92076 sont légèrement supérieurs à ceux de la variété BR62002 (tableaux 9 et 11).

Les rendements obtenus sur la date de plantation n°2 novembre 2011) sont supérieurs, à l'âge de 8 mois, à ceux de la première date de plantation (tableaux 9 et 10). Il est prématuré de tirer des conclusions à ce stade. Il faudra attendre les résultats obtenus à l'âge de 12 mois en novembre 2012.

Les rendements obtenus sur cet essai agronomique sont inférieurs à ceux, très élevés, obtenus sur l'essai variétal V5. En revanche, ils sont comparables à ceux obtenus dans l'essai V2 (Chopart 2011, note scientifique n°2). Une explication pourrait être que le précédent cultural de l'essai V5 était une jachère de plusieurs années, tandis que l'essai agronomique a été implanté immédiatement après une culture de canne à sucre.

Tableau 9 Essai Agro1. Mesures de biomasse sur des cannes âgées de 8 mois (février 2012) sur les deux traitements avec récolte à 8 mois et récolte à 12 mois. Les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| | | Traitement réc. 8 mois | | Traitement rec. 12 mois | |
|----------------------------|-----------|------------------------|------------|-------------------------|------------|
| Variété | | BBZ92076 | BR62002 | BBZ92076 | BR62002 |
| Poids tiges usinables t/ha | | 58a | 75a | 78a | 69a |
| Taux matière sèche % | Tiges | 27a | 24ab | 28a | 21b |
| | Amarres | 23a | 21a | 25a | 22a |
| | F. vertes | 25b | 24b | 29a | 25b |
| Rdt matière sèche t/ha | Tiges | 15.9a | 17.4a | 21.7a | 15.0a |
| | Amarres | 6.0a | 5.9a | 6.5a | 5.8a |
| | F. vertes | 1.8a | 2.7a | 2.3a | 3.1a |
| | F. sèches | 3.2ab | 1.9b | 5.1a | 1.2b |
| TOTAL | | 27a | 28a | 36a | 25a |

Tableau 10 Essai Agro1 planté en novembre 2011. Mesures de biomasse sur des cannes âgées de 8 mois (juin 2012). Les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| Variété | | BBZ92076 | BR62002 |
|----------------------------|-----------|----------|---------|
| Poids tiges usinables t/ha | | 99a | 96a |
| Taux de matière sèche % | Tiges | 21.6a | 19.5a |
| | Amarres | 21.7a | 21.1a |
| | F. vertes | 26.7a | 22.2a |
| Rdt Matière sèche t/ha | Tiges | 21.4a | 18.9a |
| | Amarres | 8.0a | 6.3a |
| | F. vertes | 3.7a | 4.5a |
| | F. sèches | 6.6a | 1.7a |
| TOTAL | | 39.6a | 31.3a |

Tableau 11 Essai Agro1 planté en juin 2011. Mesures de biomasse sur des cannes âgées de 12 mois (juin 2012) sur les deux traitements avec récolte à 12 mois. Les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| Variété | | BBZ92076 | BR62002 |
|----------------------------|-----------|----------|---------|
| Poids tiges usinables t/ha | | 91.9a | 116.4a |
| Taux matière sèche % | Tiges | 31.4a | 28.9a |
| | Amarres | 25.a | 23.1a |
| | F. vertes | 34.8a | 30.8b |
| Rdt Matière sèche t/ha | Tiges | 28.4b | 33.6a |
| | Amarres | 11.6a | 7.8b |
| | F. vertes | 2.7b | 5.5a |
| | F. sèches | 8.6a | 3.4b |
| TOTAL | | 51.4a | 50.3a |

Essai Agro 2. Date de plantation août 2011

L'essai agronomique n° 2 a été planté vers le 15 août 2011. Il a poussé normalement, (photos 13, 14, 15). On ne dispose que des résultats à 8 mois (mi-avril 2012).



Photo n°14 essai agro2 A l'arrière-plan, vue, le 5 avril 2012, de l'essai planté en août 2011.



Photo n°15 essai Agro 2 perspective entre deux blocs statistiques le 5 avril (8 mois).

Les résultats (tableau 12) indiquent que les rendements à l'âge de 8 mois sont meilleurs que ceux obtenus au même stade sur l'essai Agro, sans que l'on puisse dire, pour le moment, si cela est dû à un effet variétal ou à la date de plantation. Il faudra attendre, en phase 2, les résultats à 12 mois de cet essai et ceux de l'essai Agro1 (sous-essai planté en novembre 2011), pour une évaluation plus complète.

Tableau n°12 Essai Agro2. Mesures de biomasse sur des cannes âgées de 8 mois (avril 2012. Les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| Variété | | R579 | WI87603 | TC8 |
|------------------------------------|-----------|-------|---------|-------|
| taux de mat sèche % | Tiges | 24.1a | 29.7a | 28.4a |
| | Amarres | 24.8a | 25.0a | 23.4a |
| | F. vertes | 20.0a | 28.3a | 28.6a |
| Rendement matière sèche t/ha | Tiges | 24.3a | 20.3a | 24. a |
| | Amarres | 4.7a | 8.1a | 8.4a |
| | F. vertes | 3.4a | 3.0a | 2.3a |
| | F. sèches | 2.6a | 4.2a | 5.8a |
| Total | | 35.0a | 35.6a | 40.6a |

1.3.2 Estimation de la biomasse résiduelle potentiellement disponible après une culture de canne à usage de combustible

Introduction

Au cours de la première phase du programme, il a été décidé que les tiges usinables, les parties sommitales des tiges, les feuilles vertes et les feuilles sèches attachées à la plante lors de la coupe seraient de la biomasse combustible. Les autres parties ne sont pas utilisées et restent au champ. Il s'agit du bas des tiges aériennes, en-dessous de la barre de coupe, de la partie souterraine des tiges, des racines, des feuilles tombées au sol en cours de cycle. Ces trois premiers ne sont pas utilisables. En revanche, l'intérêt, ou non, de l'utilisation comme combustible des feuilles tombées au sol, peut faire l'objet d'un débat. Mais pour débattre objectivement, il faut connaître la quantité et la qualité de cette biomasse et donc sa contribution potentielle à l'équilibre

organique du sol. Dans le programme REBECCA, la biomasse des parties combustibles, qui constitue un des paramètres de base de la rentabilité de la future filière, est évaluée de façon détaillée (partie 1.2).

La biomasse résiduelle est définie ici comme la biomasse non directement utile car non utilisée pour sa fonction énergétique. Cette biomasse résiduelle n'a pas été, jusqu'à maintenant, quantifiée aussi précisément que la biomasse combustible dans le programme de recherche à vocation très finalisée. Des estimations ont néanmoins été faites, notamment sur les feuilles tombées naturellement au sol et sur les racines superficielles.

L'objectif de cette étude est donc d'estimer les biomasses des parties non combustibles de la canne combustible restant sur ou dans le sol. Ces informations doivent aider à des décisions sur l'utilisation, ou non, des feuilles tombées au sol comme biomasse combustible. L'étude vise à aider à des prises de décisions opérationnelles qui devront, bien-sûr, prendre en compte d'autres paramètres, agronomiques, économiques, environnementaux, voire industriels.

Cette étude a fait l'objet d'une note technique REBECCA (n°9) qui figure dans le dossier de la production de la phase 1. On ne présente donc ici qu'une version synthétique, sans donner, en particulier, le détail de la partie matériel et méthode.

Matériel et méthodes

Le dispositif expérimental est détaillé par ailleurs (Chopart et Marie 2012)

Estimation de la biomasse des feuilles tombées au sol (FT)

Lorsque la canne a eu environ 5 mois, avant toute chute de feuilles, un filet en matière plastique de 1,05x 1,55 m a été posé sur le sol entre deux rangs de cannes espacés de 1.55 m au sol (photo 16). Les mailles de ce filet en matière imputrescible sont d'environ 8 cm x 4 cm permettant un bon contact des feuilles avec le sol et un recueil facile et précis de ces feuilles. Il n'est toutefois pas exclu que cette barrière partielle entre les feuilles et le sol ait eu pour conséquence un léger ralentissement du processus de décomposition. Les valeurs obtenues seraient alors légèrement surévaluées. Du fait de l'espace occupé par les touffes de cannes, les premiers 20 cm de sol à partir du centre de la touffe ne reçoivent pas de feuilles mortes. A la récolte, lorsque la culture a été âgée de 12 mois, les feuilles tombées naturellement sur les filets (FT) ont été prélevées.



Photo n° 16 : Feuilles tombées naturellement au sol sur le filet permettant leur prélèvement, dans une culture âgée de 12 mois variété WI 79 761.

La biomasse des FT a été scindée en deux catégories : les feuilles pas ou peu décomposées, dites feuilles tombées brutes (FTB) et les feuilles ayant déjà commencé un processus de décomposition au contact du sol (FTD). Ces deux catégories de feuilles sont faciles à identifier par leur couleur

et leurs propriétés, notamment leur fragilité (photo 17). Les FTB et les FTD ont été séchées (48 heures à 60°C, puis deux heures à 85°C) avant d'être pesées séparément.



Photo 17 : Echantillon de feuilles tombées au sol naturellement avant la récolte. A gauche : feuilles en décomposition (FTD). A droite : feuilles non décomposées (FTB).

Estimation de la biomasse des tiges non récoltées et des racines (entre 0 et 30 cm)

Trois variétés de l'essai V4 ont été étudiées (R579, WI81456, WI86015) à l'âge de 10 mois. Dans chacune des trois répétitions, une touffe représentative a été échantillonnée, ce qui fait 9 sites de mesures. Des mesures de biomasse sèche ont été faites sur des parties des tiges:

- base des tiges aériennes entre 0 et 10 cm de la surface du sol,
- partie souterraine de la tige, entre la bouture et la surface après séparation des racines.

Une estimation de la biomasse racinaire entre la surface et 30 cm de profondeur a été réalisée, sur les mêmes 9 parcelles, par la méthode des monolithes (Chopart, 1999, Chopart, 2004).

Dans l'interligne, 4 cubes de sol de 15 cm de côté ont été prélevés à deux distances du rang de canne, à deux profondeurs (0-15 et 15-30 cm) et à deux distances du centre du rang (fig. 12).

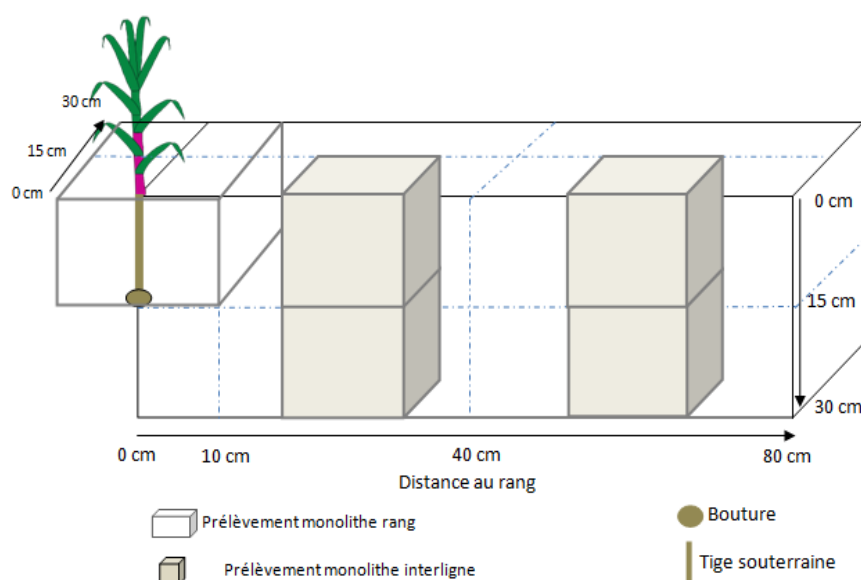


Figure 12 : Position des monolithes de mesures de densités racinaires par rapport au centre du rang et espaces représentatifs de chaque monolithe ;

Ces distances sont retenues pour obtenir des résultats représentatifs

- monolithe entre 18 et 33 cm du rang : représentatif de l'interligne entre 10 et 40 cm
- monolithe entre 53 et 68 cm du rang : représentatif de l'interligne entre 40 et 80 cm

Les racines situées à proximité immédiate du rang de canne, entre 0 et 10 cm de part et d'autre du rang et entre 0 et 15 cm de profondeur ont été prélevées dans le monolithe de 15 cm de profondeur, 20 cm de largeur et d'environ 30 cm de long qui contenait la touffe de canne, puis traitées comme les racines issues des monolithes. Dans l'horizon sous-jacent, entre 15 et 30 cm de profondeur sous le rang de canne, la biomasse racinaire a été considérée comme identique à celle de la distance 18- 33 cm à la même profondeur.

Les racines dépassant du monolithe de sol lors de l'extraction de celui-ci ont été soigneusement sectionnées. Au total, 36 monolithes de sol de 15 cm d'arête et 9 monolithes de 30x20x15 cm ont été prélevés.

Les racines ont été extraites des monolithes par tamisage (mailles de 2 mm), sous l'eau, puis lavées minutieusement afin qu'il ne reste aucune trace de terre (Chopart, 2004). Elles ont ensuite été séparées en deux catégories: racines fines (diamètre inférieur à 1mm) et grosses (photo 18). Les échantillons sont ensuite placés à l'étuve à 60°C pendant 48 heures et pesés à poids constant.



Photo 18 : Echantillon de racines après séparation entre les racines fines (diamètre <1 mm) et grosses racines (diamètre >1 mm).

Ces mesures référencées dans l'espace ont permis d'obtenir, in fine, une estimation de la biomasse totale par unité de surface au sol, en canne plantée en rangs de 1.6 mètre. Pour cela, les résultats bruts obtenus à différentes profondeurs et distances du rang ont été pondérés en fonction de leur volume représentatif (figure 12).

Un espace couvrant un demi-interligne sur 30 cm de long et 30 cm de profondeur a été considéré comme l'unité volumique de base représentative, prenant en compte les gradients verticaux, transversaux et longitudinaux, sur 30 cm de profondeur. La biomasse racinaire (en t/ha) a été estimée à partir de cet espace représentatif. La biomasse racinaire située en dessous de 30 cm de profondeur n'a pas été évaluée.

Résultats

Biomasse des feuilles tombées au sol (FT)

Les valeurs des biomasses sèches des feuilles tombées naturellement au sol (FT) sont dans la figure 13 et dans les tableaux 13 et 14.

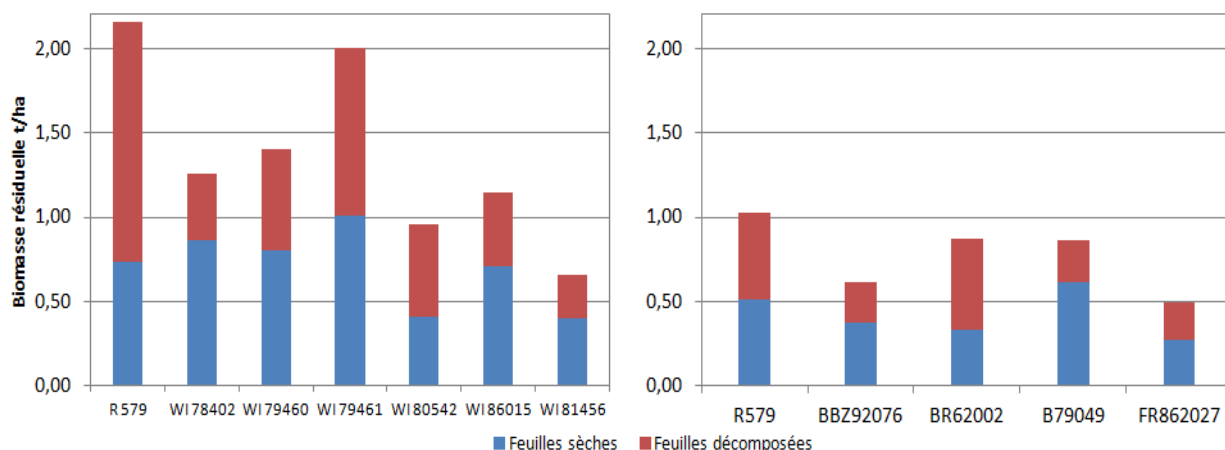


Figure 13 : Biomasse sèche (t/ha) des feuilles tombées au sol avant récolte. Résultats de deux essais : V4 12 mois (à gauche) et V5 12 mois (à droite). Les feuilles sont classées en deux catégories : feuilles non décomposées et celles ayant subi un début de décomposition.

Tableau 13 : Biomasse sèche (t/ha) des feuilles tombées naturellement au sol avant récolte. Résultats de l'essai V4. Les feuilles sont classées en deux catégories : feuilles non décomposées (FTB) et celles ayant subi un début de décomposition (FTD). Sur une même ligne, les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0,05.

| | R579 | WI 78402 | WI79460 | WI 79461 | WI 80542 | WI 86015 | WI 81456 |
|---------------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| Feuilles non décomposées | 0,739 (a) | 0,860(a) | 0,807(a) | 1,009(a) | 0,414(a) | 0,713(a) | 0,403(a) |
| Feuilles en décomposition | 1,418 (a) | 0,397(b) | 0,598(b) | 0,992(ab) | 0,540(b) | 0,428(b) | 0,253(b) |
| Total | 2,157 | 1,257 | 1,405 | 2,001 | 0,954 | 1,141 | 0,656 |

Tableau 14 : Biomasse sèche (t/ha) des feuilles tombées naturellement au sol avant récolte. Résultats de l'essai V5. Les feuilles sont classées en deux catégories : feuilles non décomposées et celles ayant subi un début de décomposition. Sur une même ligne, les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0,05.

| Variétés | R579 | BBZ92076 | BR62002 | B79049 | FR862027 |
|---------------------------|---------|----------|---------|---------|----------|
| Feuilles non décomposées | 0,52(a) | 0,38(a) | 0,33(a) | 0,61(a) | 0,27(a) |
| Feuilles en décomposition | 0,51(a) | 0,24(a) | 0,54(a) | 0,25(a) | 0,23(a) |
| Total | 1,03 | 0,61 | 0,87 | 0,87 | 0,50 |

Dans l'essai V5, la biomasse des FT du témoin R579 est nettement inférieure à celle du même témoin dans l'essai V4. A l'âge de 8 mois, le rendement de V5, exprimé en biomasse sèche totale, n'était que légèrement inférieur à celui de V4 (- 5%) mais avec une quantité de feuilles sèches inférieure de 50% (Chopart 2012). Cet écart paraît dû à la forte verse lors de l'évènement pluvieux du 24 novembre 2011, comme déjà signalé dans le paragraphe 1.21. Cette verse a été plus marquée sur l'essai V5 que sur V4 (Chopart 2012). De plus, la variété R579 a été plus affectée que les autres. Cette verse a entraîné l'apparition tardive de nouvelles feuilles et de nouvelles tiges, ce qui a modifié la proportion de feuilles vertes et sèches. Les résultats obtenus sur la variété R579 dans l'essai V5 sont donc moins représentatifs que ceux de l'essai V4.

La quantité totale de feuilles tombées du témoin R579 (entre 1 et 2 t/ha) est supérieure à celle des autres variétés. Ces résultats confirment la chute importante des feuilles de la variété R579 en fin de cycle. C'est une propriété connue de cette variété (eRcane, 2010) ; en culture de canne à sucre, c'est une qualité recherchée.

Dans l'essai V4, il existe une variabilité de la biomasse totale de FT d'une variété testée à l'autre, entre 2 t/ha et 0.7 t/ha. Le maximum de 2 t/ha obtenu sur la variété WI 79461 représente toutefois

moins que 3% de la biomasse totale. En considérant la moyenne des 6 variétés de Barbade (WI), la biomasse de FT ne représente que 1.7 % de la biomasse totale potentiellement utilisable comme combustible (figure14).

Les feuilles de type FTD et FTB sont en proportion variable suivant les variétés (figure 13 et tableaux 13 et 14), mais les feuilles de type FTD représentent un pourcentage toujours supérieur à 30% et pouvant atteindre 60 %. Sur l'essai V4, les biomasses de FTD obtenues sur les variétés R579 et WI79461 sont significativement supérieures à celles des autres variétés, ce qui tend à montrer que la WI79461 perd ses feuilles en quantité plus importante que les autres variétés WI et plus tôt, entraînant une décomposition des feuilles plus avancées. Ces résultats sont en accord avec des mesures de croissance en début de cycle qui ont montré que la variété WI79461 a une forte vigueur à la levée et une croissance rapide (Chopart 2012a).

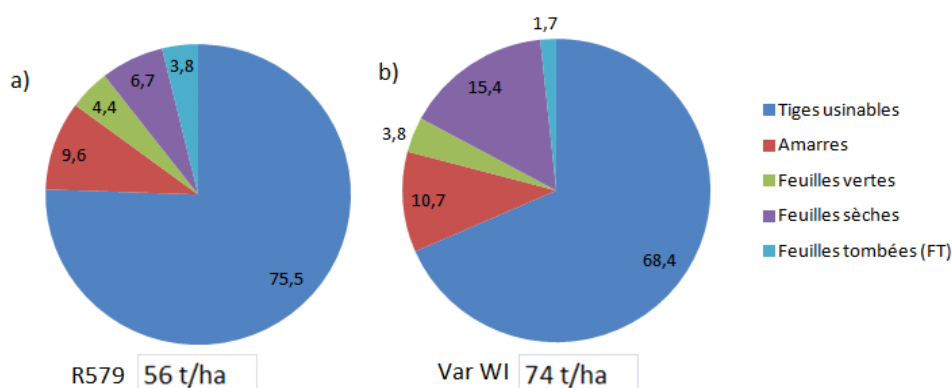


Figure 14: Essai V4. Répartition pondérale des différentes composantes de la biomasse sèche totale des parties aériennes en % de la biomasse totale, à 12 mois. (a) témoin R579, (b) moyenne des 6 variétés WI.

Biomasse de la base des tiges aériennes et des tiges souterraines

La partie de la tige située au-dessus de la surface du sol et en dessous de la hauteur de coupe de la récolteuse, représente une biomasse non négligeable, entre 3.5 et 5 t/ha (tableau 15). En première année de plantation, la partie souterraine des tiges issues des bourgeons des boutures plantées à 15 cm de profondeur environ, représente une biomasse d'environ 4 tonnes par hectare.

Tableau 15 : Rendement moyen en t/ha des tiges souterraines et 10 premiers centimètres des tiges aériennes chez 3 variétés de cannes, essai V4 12 mois en première année de plantation.

| | Tige souterraine | Base tige (10cm) |
|---------|------------------|------------------|
| R579 | 3,99 | 3,60 |
| WI86015 | 3,87 | 3,80 |
| WI81456 | 5,37 | 4,97 |
| Moyenne | 4,41 | 4,12 |

Biomasse des racines (0-30 cm)

La biomasse racinaire sèche des racines de gros diamètre (>1 mm) est plus élevée que celle des racines fines (tableau 16), ce qui est en accord avec les données de la littérature (Chopart *et al.*, 2010). Il en est de même pour le gradient entre les profondeurs 0-15 et 15-30 cm. Entre 0 et 30 cm, la biomasse totale fluctue d'environ 1.8 à environ 2.5 tonnes/ha/an d'une variété à l'autre. Ces valeurs de biomasse racinaire sont en accord avec des résultats obtenus au champ en conditions proches (Chopart et Marion, 1994; Evensen *et al.*, 1997; Chopart *et al.*, 2010; Azevedo *et al.*, 2011).

Tableau 16 : Biomasse racinaire (t/ha) entre 0 et 30 cm de profondeur de 3 variétés de cannes.

| profondeur | | Biomasses sèche en t/ha | | |
|------------|-----------------|-------------------------|---------|---------|
| | | R579 | WI86015 | WI81456 |
| 0-15 | Racines fines | 0,33 | 0,28 | 0,36 |
| | racines grosses | 0,73 | 1,02 | 0,95 |
| | total 0-15 | 1,07 | 1,30 | 1,31 |
| 15-30 | Racines fines | 0,34 | 0,24 | 0,17 |
| | Racines grosses | 0,51 | 0,87 | 0,40 |
| | total | 0,85 | 1,12 | 0,57 |
| total 0-30 | Racines fines | 0,67 | 0,53 | 0,53 |
| | racines grosses | 1,25 | 1,90 | 1,35 |
| | total | 1,92 | 2,42 | 1,88 |

En revanche, elles sont inférieures à certaines données de la littérature, en particulier de van Dillewijn qui avance une production de biomasse racinaire de 7.7 tonnes pour une production de tiges usinables de 100 t/ha, mais ces données concernent tout le système racinaire jusqu'au front racinaire estimé par cet auteur à plus de 5 mètres de profondeur et non les 30 premiers cm du profil comme dans cette étude.

Le système racinaire de la variété WI86015 semble être plus performant que celui des deux autres variétés étudiées (tableau 4), mais ces premiers éléments doivent être confirmés avant d'être considérés comme consistants. Il existe bien un gradient de biomasse entre la ligne et l'interligne, mais l'interligne contient néanmoins une densité de biomasse racinaire consistante (figure 15).

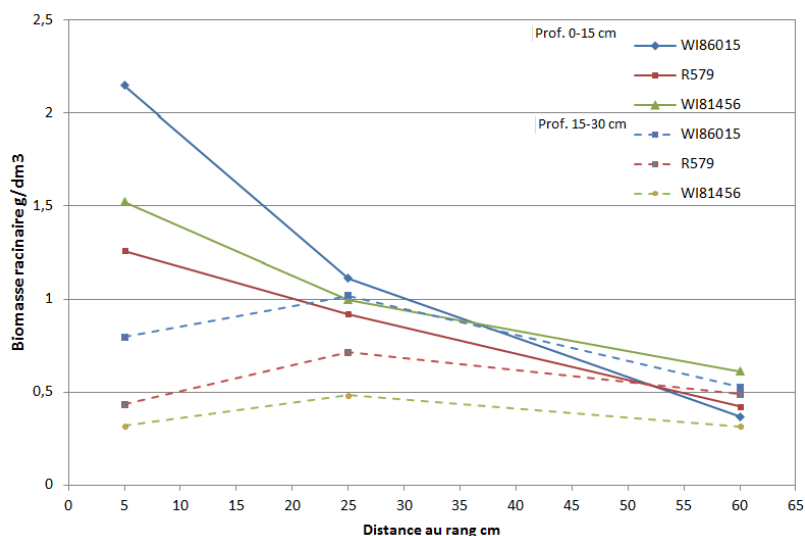


Figure 15 : Gradient de densité racinaire (g/dm³) sur un interligne à 2 profondeurs en fonction de la distance au rang chez 3 variétés de cannes, essai V4 12 mois.

Biomasse sèche totale (parties aériennes et souterraines) de trois variétés

A partir des résultats concernant les parties considérées comme non combustibles, et de ceux, disponibles par ailleurs, concernant les parties combustibles des variétés de cannes étudiées, il a été possible d'examiner la part de chacun des compartiments de deux variétés WI86015 et WI81456 et du témoin R579. Ces résultats sont rapportés en tableau 17 et en figure 16.

Tableau 17 : Rendement des composantes de la biomasse sèche en t/ha sur 3 variétés de l'essai V4 à 12 mois.

| | R579 | WI86015 | WI81456 |
|--------------------|-------|---------|---------|
| Tiges usinables | 42,68 | 42,00 | 53,29 |
| Amarres | 5,42 | 8,66 | 6,69 |
| F. vertes | 2,46 | 2,23 | 2,21 |
| F. sèches | 3,78 | 8,19 | 10,59 |
| Feuilles tombées | 2,16 | 1,14 | 0,66 |
| Tiges souterraines | 0,80 | 0,77 | 1,07 |
| Base tiges (10 cm) | 3,60 | 3,80 | 4,97 |
| Racines | 1,92 | 2,42 | 1,88 |
| Total | 62,81 | 69,22 | 81,36 |

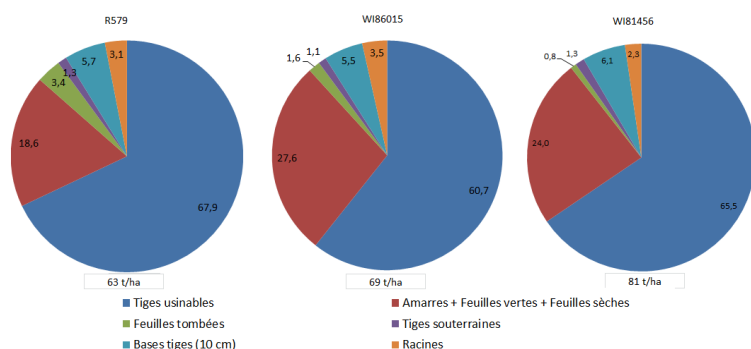


Figure 16 : Répartition pondérale des différentes composantes de la biomasse de trois variétés de l'essai V4 (R579, WI86015 et WI81456).

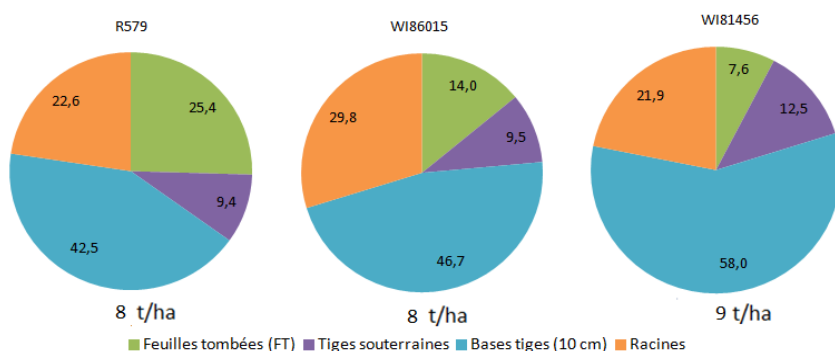


Figure 17 : Répartition pondérale de la biomasse non combustible de trois variétés (R579, WI86015 et WI81456).

La partie de la tige située sous le sol, issue de la bouture plantée, a une fonction essentielle en première année de culture, puisque c'est à partir de celle-ci que vont apparaître les racines (après la phase initiale de levée où les racines des boutures jouent un rôle important mais fugace). Ces tiges souterraines directement issues de la bouture, ne sont produites qu'en première année de culture, ce qui réduit leur contribution à l'apport en biomasse sur la durée d'une culture de canne (de 5 à 8 ans). En repousse, la base des tiges peut être souterraine, mais la biomasse est faible. C'est pourquoi, dans l'estimation des contributions des parties non combustibles à la matière organique du sol du tableau 17 et des figures 16 et 17, les valeurs retenues ont été celles obtenues en année de plantation, divisées par 5, c'est-à-dire la durée moyenne estimée d'une culture de canne à sucre avant replantation.

Les parties de la plante utilisées comme combustible (tiges usinables, amarres, feuilles restées attachées à la plante) représentent, de loin, la biomasse totale la plus importante (85 à 90%). Les 10 à 13 % restant sont, en grande partie, composés d'une biomasse non combustible. Seules les FT pourraient être utilisées, mais elles ne représentent qu'une faible partie de la biomasse totale, d'environ 1% (figure 16, tableau 17).

Les parties considérées comme non combustibles, laissées au champ, constituent un apport de matière organique. En admettant que les tiges souterraines ne sont surtout produites qu'à chaque replantation, tous les 5 ans, et que le système racinaire se renouvelle chaque année, il est possible d'estimer la quantité totale de biomasse de canne à sucre restituée au sol chaque année pour servir d'apport de matière organique et la contribution de chaque compartiment (tableau 18, figure 17). La biomasse totale restituée au sol est de 8 à 9 t/ha /an, ce qui n'est pas négligeable, même si elle est nettement inférieure à la biomasse laissée au champ en culture de canne à sucre, qui comprend, en plus, de 10 à 25 t/ha de tiges non usinables et de feuilles. Les FT représentent 25% de cette biomasse restituée au sol, chez le témoin R 579, mais seulement 8% chez la variété WI456 (figure 17).

Grâce aux FT, qui apportent de la matière organique dans l'interligne en surface, la répartition spatiale de la matière organique apportée chaque année dans le profil est assez homogène (tableau 18). Elle est plus homogène que si les feuilles tombées au sol sont exportées.

Tableau 18 : Apport de biomasse dans les différents compartiments du sol exprimé en g/dm³ chez 3 variétés de l'essai V4 à 12 mois (a) : R579, (b) : WI86015, (c) : WI 81456).

| a) R579 | | 0-10 cm | 10-40cm | 40-80cm |
|----------|---------------------------|---------|---------|---------|
| 0-15 cm | Tiges aériennes (0-10 cm) | 2,4 | 0 | 0 |
| | Tiges souterraines | 0,53 | 0 | 0 |
| | Racines | 1,26 | 0,92 | 0,42 |
| | Feuilles tombées (FT) | 0 | 1,44 | 1,44 |
| | Total | 4,19 | 2,36 | 1,86 |
| 15-30 cm | Racines | 0,43 | 0,71 | 0,49 |

| b) WI86015 | | 0-10 cm | 10-40cm | 40-80cm |
|------------|---------------------------|---------|---------|---------|
| 0-15 cm | Tiges aériennes (0-10 cm) | 2,53 | 0 | 0 |
| | Tiges souterraines | 0,52 | 0 | 0 |
| | Racines | 2,15 | 1,11 | 0,37 |
| | Feuilles tombées (FT) | 0 | 0,76 | 0,76 |
| | Total | 5,2 | 1,87 | 1,13 |
| 15-30 cm | Racines | 0,80 | 1,02 | 0,53 |

| c) WI81456 | | 0-10 cm | 10-40cm | 40-80cm |
|------------|---------------------------|---------|---------|---------|
| 0-15 cm | Tiges aériennes (0-10 cm) | 3,31 | 0 | 0 |
| | Tiges souterraines | 0,72 | 0 | 0 |
| | Racines | 1,52 | 0,44 | 0,44 |
| | Feuilles tombées (FT) | 0 | 1 | 0,61 |
| | Total | 5,55 | 1,44 | 1,05 |
| 15-30 cm | Racines | 0,32 | 0,48 | 0,32 |

Pouvoir calorifique des feuilles sèches

Le pouvoir calorifique des feuilles tombées au sol a été évalué de façon identique à celle des feuilles sèches restées attachées aux tiges. Il n'y a pas de différence entre variétés. Il n'y a pas non plus de différence entre feuilles sèches restées attachées à la tige et feuilles tombées (Chopart et Marie 2012).

Discussion

Biomasse des feuilles tombées au sol

Les biomasses des feuilles tombées sur le sol (FT) ont été obtenues, à la récolte, par une méthode simple. Il se peut que les valeurs obtenues soient légèrement surestimées à cause de la barrière partielle que constitue le filet et de quelques particules de terre restées attachées aux feuilles. Il se peut également qu'une (faible) partie des FT soit déjà transformée en matière organique plus évoluée, donc non mesurée. La contribution des FT en tant qu'apport de matière organique est donc, peut-être, un peu sous-évaluée. Les résultats obtenus restent néanmoins représentatifs, au moins des conditions locales, avec un climat tropical humide.

La biomasse issue des FT avant la récolte est fluctuante d'une variété à l'autre. Celle perdant le plus de feuilles est le témoin R579, avec environ 2,1 t/ha. C'est en effet une originalité de cette variété sucrière sélectionnée à La Réunion où la récolte manuelle est encore majoritaire. Cet épillage naturel facilite, en effet, la récolte manuelle. Mais ce témoin local n'a pas vocation à être retenu comme canne combustible. Parmi les 10 variétés étudiées, seule une, la WI79461, a une quantité de feuilles tombées qui approche celle du témoin (2,0 t/ha). Chez les autres variétés, elle est comprise entre 0,5 et 1,5 t/ha, soit moins de 2 % de la biomasse totale.

À la récolte, une partie importante (de 30 à 50 %) de cette biomasse est déjà en début de décomposition, ce qui rend problématique son ramassage et son utilisation comme combustible ou comme aliment du bétail. En revanche, la matière organique issue de ces feuilles, faible quantitativement, est bien répartie dans l'interligne à la surface, dans un espace où il n'y a pas d'autres apports.

Biomasse des autres parties non combustibles de la plante : partie basse des tiges et racines

La biomasse de la partie souterraine de la tige est, en première année de plantation, d'environ 4 t/ha. Sur la durée d'une plantation de 5 à 7 ans, cela représente une faible contribution de matière organique. Chaque année, les parties basales des tiges aériennes, non récoltées, représentent une biomasse d'environ 4 tonnes de matière sèche (tableau 18). Cette biomasse a une fonction de réserves nutritives et de lieu d'émergence des tiges.

La biomasse constituée par les racines est un compartiment rarement pris en compte, ou de façon grossière, dans les bilans de biomasse et dans les bilans organiques. Ceci est dû à la difficulté de la mesure. Malgré cette difficulté, des évaluations ont été faites, car en système de canne combustible, où la plus grande partie de la matière organique est exportée, les racines peuvent jouer un rôle important d'apport de matière organique.

La difficulté et la lourdeur des méthodes à mettre en œuvre pour l'estimation de la biomasse racinaire font que ce paramètre ne peut pas être obtenu avec autant de précision que la biomasse aérienne. La méthodologie appliquée, qui prend en compte les gradients entre le rang de canne et l'interligne, permet d'avoir des ordres de grandeur représentatifs.

La biomasse des racines localisées entre la surface et 30 cm de profondeur, obtenue dans ces conditions, est d'environ 2 t/ha (tableau 18). Cette biomasse est en majorité issue des grosses racines. Il y a des différences entre les trois variétés mesurées, mais il est actuellement difficile d'en tirer des conclusions. Les valeurs obtenues sont en concordance avec d'autres résultats (Azevedo *et al.*, 2011, Chopart *et al.*, 2010). Il est probable que ces biomasses mesurées à la

récolte sont légèrement inférieures à la production réelle de racines au cours du cycle végétatif, du fait de la mortalité racinaire qui peut débuter avant la récolte et de la procédure d'extraction des racines du sol qui peut faire perdre quelques racines fines.

Il y a des racines en dessous de 30 cm, jusqu'à plus de 4 mètres de profondeur en conditions favorables (Chopart *et al.*, 2009). Néanmoins, la décroissance de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur est très rapide (Chopart *et al.*, 2009). Il a donc été possible, de négliger l'apport en matière organique que représentent les racines localisées en dessous de 30 cm. Il peut être estimé grossièrement à partir des données obtenues entre 0 et 30 cm et celles de la littérature (Azevedo *et al.*, 2010, Chopart *et al.*, 2009). La biomasse racinaire localisée entre 30 et 100 cm est comprise entre 0,4 et 0,8 t/ha. La biomasse d'origine racinaire est donc du même ordre de grandeur que celle provenant de la partie basale des tiges. Toutefois, la qualité de cette biomasse est très nettement supérieure à celle des tiges. En effet, la matière organique en provenance des tiges est localisée dans le profil de sol, à proximité du rang, pouvant y créer un excès de matière organique. Au contraire, la biomasse racinaire est très bien répartie dans le sol, y compris au milieu de l'interligne et en profondeur. La matière organique en provenance des racines a donc, a priori, une efficacité bien supérieure sur le sol, sur son statut organique et ses propriétés.

Les feuilles tombées au sol : combustible ou contribution au maintien du stock organique du sol?

La biomasse des feuilles tombées au sol est faible, entre une et deux tonnes de matière sèche par hectare, dont plus de la moitié est déjà en partie décomposée. Sur le témoin, cette biomasse de FT représente environ 25% de la biomasse laissée au sol (figure 17), mais seulement de 8 à 15% pour les variétés fibreuses sélectionnables comme cannes combustibles (0,7 à 2 tonnes/ha/an).

Faut-il utiliser cette biomasse comme combustible, ou faut-il la gérer comme un stock de matière organique qui a vocation à contribuer au maintien de la fertilité des sols ?

Cette biomasse de FT est située en surface, donc complémentaire de celle des racines. Elle constitue une matière organique de bonne qualité.

L'utilisation des FT comme combustible nécessiterait un ramassage mécanique post récolte qui, outre son coût, risquerait d'endommager les jeunes repousses de canne.

La teneur en matière organique du sol de la zone concernée par le programme REBECCA est d'environ 4%, ce qui n'est pas alarmant. Dans beaucoup de sols et de systèmes de culture, il serait possible d'envisager des exportations de biomasse. Dans les zones polluées par la chlordécone (CLD), il existe un facteur local très important qui fait que le taux actuel de matière organique doit être maintenu. En effet, d'après les travaux de l'INRA à la Guadeloupe (Cabidoche *et al.* 2009), la matière organique du sol sert de lieu principal de rétention des molécules de CLD. Avec le taux actuel de matière organique, la CLD est piégée, avec en conséquence, une teneur modérée en CLD dans la solution du sol et donc dans l'environnement. Toute diminution de la teneur en matière organique de ces sols entraînerait, directement, une diminution de la capacité de rétention du stock de molécule de CLD. Les conséquences à terme seraient une augmentation de la CLD dans la solution du sol donc dans l'eau et in fine chez les animaux et les hommes.

Dans les zones polluées, il faut donc maintenir le niveau actuel du stock de matière organique. En conséquence, à ce stade de nos connaissances, il n'apparaît pas souhaitable, d'utiliser comme combustible ces feuilles tombées au sol, qui pourraient contribuer, en quantité et en qualité, à la durabilité de ce système de culture intensive de canne combustible.

Le maintien sur la parcelle des feuilles tombées naturellement au sol paraît nécessaire pour des raisons environnementales (piégeage de la CLD) dans ces nouveaux systèmes de culture de canne à vocation combustible.

Mais est-ce suffisant pour permettre le maintien du stock organique du sol et le piégeage de la CLD ? Il n'est pas possible, ici, de répondre de façon précise à cette question qui nécessite des

travaux de recherches élargis. Les résultats présentés permettent de servir de point de départ à ces études, avec une première quantification locale des apports de matière organique dans les futurs systèmes de canne combustible nécessaires pour assurer la durabilité du système de culture en respectant les exigences environnementales.

1.3.3 Conclusions partielles Perspectives

L'étude des dates de plantation et de récolte a débuté en phase 1 avec l'implantation de deux essais agronomiques lourds qui ne pourront donner lieu à une analyse qu'en fin de phase 2, après 24 mois de culture ; il n'est donc pas possible de conclure sur ce point sinon pour dire que l'outil d'étude est en place. En revanche, la première étude effectuée sur la biomasse que constituent les feuilles tombées au sol montre que le tonnage est très faible et qu'il doit servir en priorité à renouveler la matière organique du sol pour le maintien de ce niveau.

1.4 Multiplications des meilleures variétés en vue d'une phase 2

En anticipation d'une seconde phase du programme REBECCA, plusieurs dispositifs de multiplication ont été mis en place en phase 1, dès que l'on a pu repérer les variétés les plus prometteuses et que l'on a eu des tiges pouvant être bouturées. Ces cannes pourront servir de boutures en début de phase 2 (octobre 2012).

Les deux principaux dispositifs sont les suivants:

Multiplication 2

Cette multiplication a été plantée en février 2012, avec 2 lignes de 25 mètres de 9 variétés (photo 19). Trois viennent de la collection CIRAD : F176, TC8, VMC86550. Les six autres viennent de la Barbade: WI 78402, WI 79460, WI 79461, WI 80542, WI 86015, WI 81 456.



Photo 19. Le 1^{er} juin 2012 vue aérienne de la multiplication n°2 avec 9 des meilleures variétés en anticipation de la phase 2 (dont les 6 WI venant de la Barbade) ; cannes âgées d'un peu plus de 3 mois, deux lignes par variété.

Multiplication 3

Le dispositif a été planté mi-avril 2012 avec 9 lignes de 30 mètres de 4 variétés : des trois les plus prometteuses venant de la Barbade : WI 79 460, WI 79 461, WI 81 456 et la meilleure (en année de plantation) venant de la collection Cirad: TC8 (photo 20)



Photo 20 Multiplication 3 ; A gauche en avril à la plantation et à droite photo aérienne le 1 juin 2012 des quatre parcelles au stade levée.

Autres sources de boutures

A côté de ces deux multiplications plantées récemment, les deux dispositifs non statistiques V1 (7 variétés) et V2 (22 variétés) mis en place avant le début du programme ont été maintenus (photo 21).



Photo 21. Dispositif V2 (22 variétés) servant de réserve de gènes, vue aérienne le 1 juin 2012.

1.5 Elaboration d'une base de données REBECCA-BD-A

(Sandrine Auzoux, Jean-Louis Chopart, Géraud de St Seine, Patrice Jacquet)

Une base de données permettant de stocker de façon structurée les données issues du volet agro-variétal a été élaborée à partir d'avril 2011. Une note scientifique présente l'outil lui-même, le contexte de son élaboration et ses fonctions (Auzoux et al. 2011, annexe : note scient 3). Elle sert de guide d'utilisateur. Seuls les principaux éléments sont repris ici.

1.5.1 Contexte et généralités sur l'outil

La base de données est nommée REBECCA-BD.A. Elle a été conçue pour la gestion des données agronomiques obtenues dans le cadre du programme de recherche « REBECCA ». Cette base de données stocke les données sur le matériel végétal testé (mesures biométriques et production, caractéristiques chimiques). Elle a été conçue pour être le plus simple possible d'usage tout en étant performante. Le suffixe est A pour Agronomie. Cette base de données est surtout un lieu de sauvegarde structurée et protégée de données brutes et non un moyen de diffusion des résultats, même provisoires. Un guide de l'utilisateur est disponible. Il vise à faciliter la manipulation de l'outil par un opérateur de saisie. L'outil a été développé sous Microsoft Access 2007. Il est basé sur un modèle de données, composé de tables reliées entre elles, qui contiennent les données relatives aux mesures réalisées sur les essais du programme REBECCA.

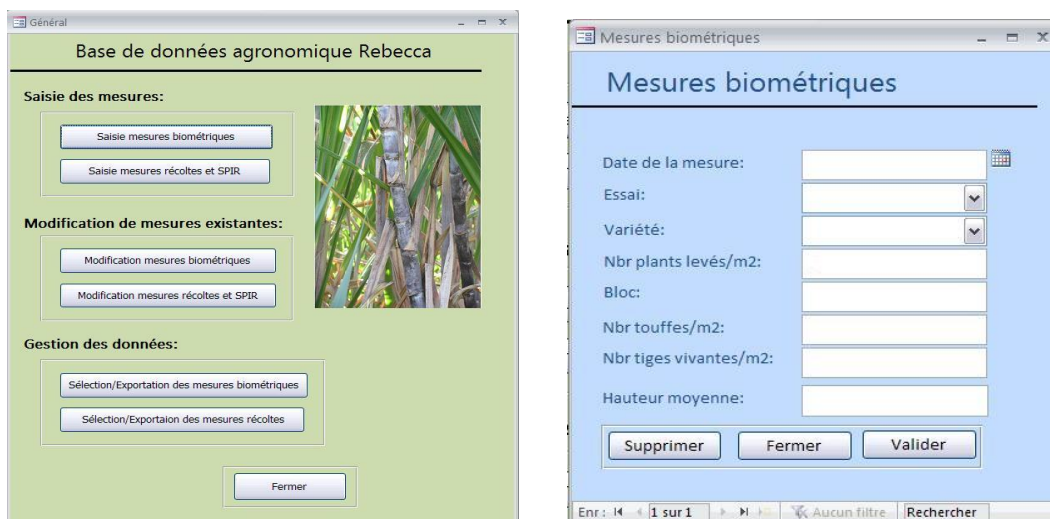
1.5.2 Quelques éléments de présentation

Dans l'écran d'accueil (figure 18), le bouton « Plus d'infos » donne le contexte de la base de données Rebecca. En appuyant sur le bouton « Démarrer », on arrive sur un formulaire général offrant à l'utilisateur trois types d'actions possibles :

- la saisie des données concernant les mesures biométriques et les mesures de récolte,
- la modification des données concernant les mesures biométriques et de récolte existantes,
- la gestion des données, c'est-à-dire exporter des mesures parmi celles déjà entrées dans la base de données.



Figure 18 Page d'ouverture de REBECCA BD-A.



Figures 19 et 20. A gauche, figure 19 : menu général pour accéder à la saisie/modification et à l'exploitation des données de mesures. Le bouton « Fermer » permet de revenir à l'écran d'accueil de l'application REBECCA-BD.A ». A droite, figure 20 : Page de saisie des mesures biométriques, avec l'agrandissement du bas de la page indiquant les numéros d'enregistrement et le défilement des enregistrements déjà saisis.

En cliquant sur le bouton « saisie mesures biométriques » du formulaire général (Fig n°19), on accède à un formulaire permettant de saisir les mesures non destructives faites en cours de cycle (nombre de plants à la levée/ m^2 , nombre de touffes/ m^2 , nombre de tiges/ m^2 , hauteur moyenne des tiges en cm) (Figure 20). En cliquant sur le bouton « Sélection/Exportation des mesures récoltes » du menu général (Figure 19), on accède à l'écran « gestion des données de récolte » (Figure 21). Cet écran permet de visualiser les données contenues dans la base avant d'exécuter une requête ou de les exporter dans un tableur.

| IdEchantillon | DatePrelev | Essai | Variete | Bloc | AgeCanne | Organe | PoidsOrgane | MSOrgane |
|---------------|------------|----------|----------|------|----------|---------------|-------------|----------|
| CV1D011T01R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 90246 | 1 | 8 | Amarre | 750 | 20.2 |
| CV1D011T01R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 90246 | 1 | 8 | Feuille sèche | 140 | 51.3 |
| CV1D011T01R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 90246 | 1 | 8 | Feuille verte | 0 | 0 |
| CV1D011T01R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 90246 | 1 | 8 | Tige | 8700 | 21.4 |
| CV1D011T02R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 70462 | 1 | 8 | Amarre | 970 | 23.3 |
| CV1D011T02R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 70462 | 1 | 8 | Feuille sèche | 1050 | 54 |
| CV1D011T02R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 70462 | 1 | 8 | Feuille verte | 0 | 0 |
| CV1D011T02R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | B 70462 | 1 | 8 | Tige | 9170 | 16.9 |
| CV1D011T03R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | BBZ 8283 | 1 | 8 | Amarre | 1150 | 21.5 |
| CV1D011T03R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | BBZ 8283 | 1 | 8 | Feuille sèche | 910 | 52 |
| CV1D011T03R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | BBZ 8283 | 1 | 8 | Feuille verte | 0 | 0 |
| CV1D011T03R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | BBZ 8283 | 1 | 8 | Tige | 9900 | 29.8 |
| CV1D011T04R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 99349 | 1 | 8 | Amarre | 1980 | 23.3 |
| CV1D011T04R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 99349 | 1 | 8 | Feuille sèche | 580 | 37 |
| CV1D011T04R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 99349 | 1 | 8 | Feuille verte | 750 | 27.5 |
| CV1D011T04R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 99349 | 1 | 8 | Tige | 13340 | 26.6 |
| CV1D011T05R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 90925 | 1 | 8 | Amarre | 1790 | 20 |
| CV1D011T05R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 90925 | 1 | 8 | Feuille sèche | 1410 | 62.5 |
| CV1D011T05R1 | 15/11/2010 | Essai V1 | FR 90925 | 1 | 8 | Feuille verte | 570 | 28 |

Figure 21 : Ecran de gestion des données à la récolte.

1.5.3 Conclusions partielles

Cette base de données permet aux scientifiques du volet économie et environnement d'avoir accès aux données agronomiques, dans une démarche de collaboration entre les agronomes et les économistes du programme REBECCA.

1.6 Relations fonctionnelles entre le rendement de matière sèche et le rendement calorifique

(Jean-Louis Chopart)

1.6.1 Objectifs

Pour sélectionner les variétés les plus performantes pour un usage de combustible, il faut connaître le pouvoir calorifique de la biomasse produite. C'est pourquoi, une méthode de prédiction du PCI à partir des mesures par spectrométrie infra rouge a été mise au point (partie 1.1). Ces résultats ont servi à évaluer le PCI de chaque composante de la biomasse de chaque variété, à plusieurs stades de végétation (parties 1.2 et 1.3). Ces résultats de biomasse sèche et de PCI ont été mis dans la base de données élaborée (partie 1.5). Ceci a permis d'évaluer, pour chaque composante de la biomasse, la valeur du PCI en kJ/g de matière sèche (partie 1.2).

1.6.2 Résultats

Le PCI sec a très peu varié en fonction des variétés et des composantes de la plante (figure 22).

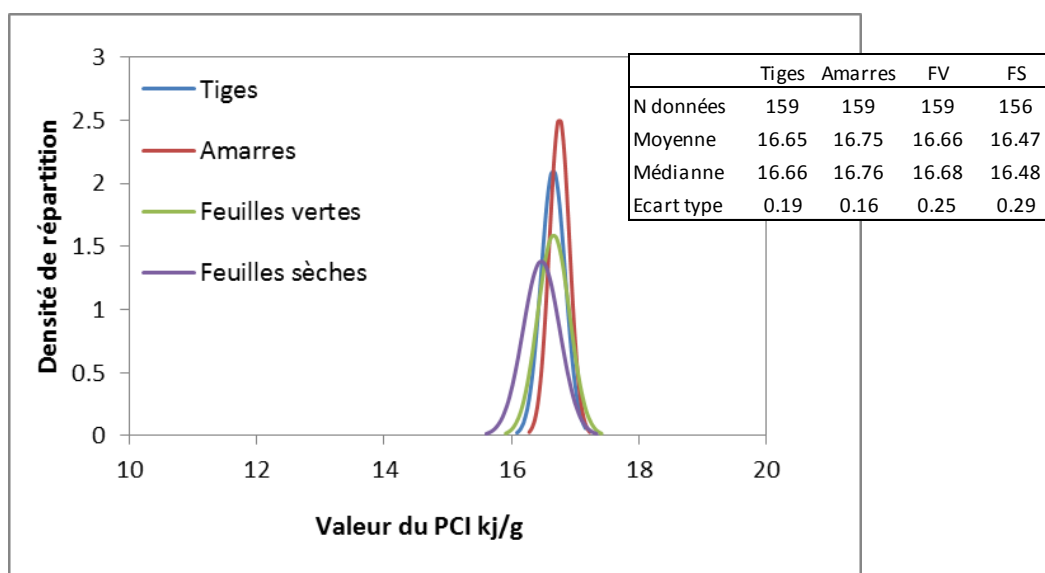


Figure 22 Distribution des valeurs de PCI des quatre composantes du rendement étudiées : tiges usinables, amarres (parties sommitales des tiges), feuilles, dans le jeu de données issues des essais variétaux et agronomiques du programme. Ces données comprennent 18 variétés, trois stades de végétation et plusieurs dates de plantation.

En regroupant les valeurs des 4 parties de la plante des variétés, des répétitions, des stades de végétation, soit 159 données, la valeur moyenne de PCI sec est de 16.6 kJ/g de matière sèche avec un faible écart-type de 0.26 et des valeurs mini et maxi de 15.7 et 17.3 kJ/g.

Si le PCI est exprimé en MJ/m², il existe une excellente relation linéaire entre rendement de biomasse sèche totale par m² et PCI sec par m², quelles que soient les variétés et les stades de végétation entre 6 et 12 mois (figure 23) :

$$\text{PCI (MJ/m}^2\text{)} = 0.0168 \times \text{MStot (g/m}^2\text{)}$$
$$R^2=0,999 \quad N = 159$$

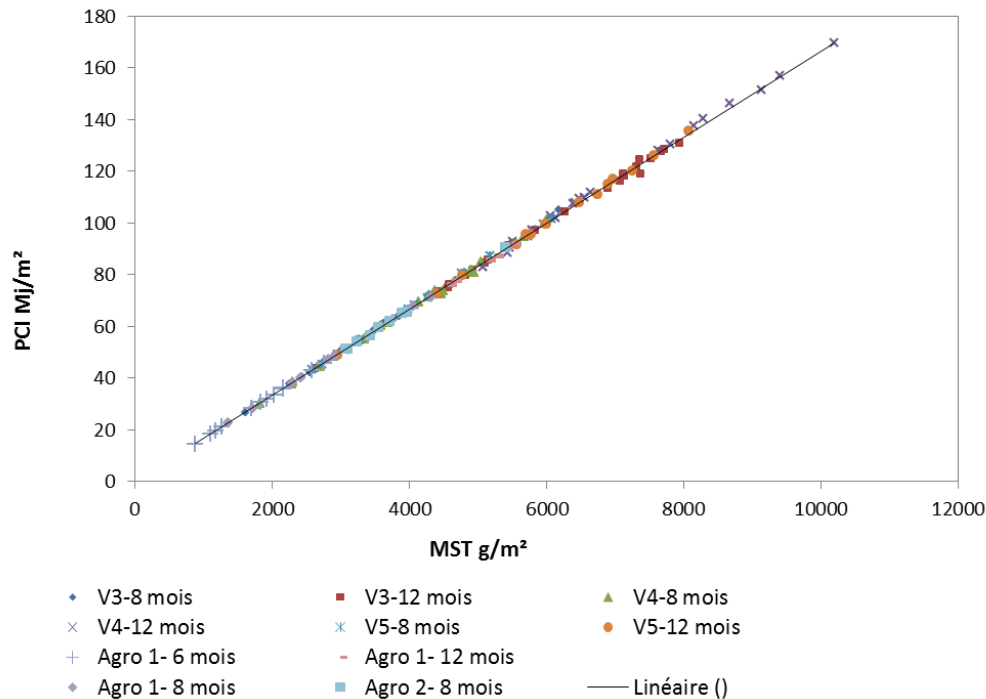


Figure 23 Relations entre la matière sèche totale de la canne à sucre (MST) et son pouvoir calorifique inférieur (PCI) dans le jeu de 159 données issues des essais variétaux et agronomiques. Ces données comprennent 18 variétés, trois stades de végétation et plusieurs dates de plantation.

1.6.3 Conclusions partielles

Grâce à ces résultats, il est maintenant possible:

1) de simplifier l'évaluation variétale et agronomique des cannes à sucre à usage énergétique en ne considérant que la plante entière,

2) d'envisager un mode simplifié de paiement au producteur de sa production de canne combustible, avec deux mesures simples sur sa biomasse à vendre : le poids de la production dans la remorque et l'humidité moyenne de la biomasse à partir d'un échantillonnage comme cela se pratique pour évaluer la richesse en sucre de la canne livrée. Avec,

- le poids frais et l'humidité de la biomasse à vendre,
- le modèle proposé, reliant la matière sèche totale et le PCI de celle-ci,
- des relations connues liant le PCI des matières sèches et humides,

l'agriculteur devrait pouvoir connaître, presque immédiatement, la valeur marchande de son produit et l'acheteur, le rendement énergétique potentiel de la production.

2. VOLET CHLORDÉCONE

La pollution de l'environnement par la chlordécone est un problème majeur dans le sud de la Basse-Terre, avec une pollution des sols qui s'inscrit dans le long terme. Cette molécule, insecticide organochloré de synthèse, a été utilisée aux Antilles de 1972 à 1993 pour lutter, notamment, contre le charançon du bananier. Son utilisation a entraîné une contamination des sols (Cabidoche *et al.*, 2011). La persistance de cette pollution dans les sols de Guadeloupe a été estimée et varie de un à quatre siècles selon la nature des sols (Cabidoche *et al.*, 2009).

Des travaux scientifiques importants sont en cours, menés par plusieurs organismes de recherche, pour cerner le problème et rechercher des solutions.

Le transfert de la molécule dans les plantes n'a été étudié que très récemment et très peu de références bibliographiques sont disponibles à ce sujet (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, sous presse). Des premiers travaux sur la canne à sucre ont néanmoins déjà été effectués à la Martinique (Lesueur-Jannoyer *et al.*, 2011 ; Cabidoche, Lesueur-Jannoyer, 2011). Ces travaux montrent en particulier qu'il existe, en culture en pots, un fort gradient de concentration dans les parties aériennes depuis la base de la tige jusqu'aux feuilles.

C'est pourquoi, en partant de ces premiers résultats et dans le cadre du programme REBECCA, des travaux sur la mobilisation de la molécule par la canne en culture de plein champ ont été réalisés, afin d'évaluer les risques environnementaux liés à cette molécule dans la future filière canne énergie.

Dans le cadre du programme REBECCA, les études concernant la chlordécone visent seulement à évaluer :

- (i) la quantité de chlordécone présente dans les différentes parties de la plante, avec évaluation de la fluctuation éventuelle en fonction des variétés et de l'âge de la plante. Il faudra, in fine, qu'il y ait le moins possible de CLD présente dans la biomasse brûlée.
- (ii) le devenir de la chlordécone lors de la combustion de la biomasse.

Le point (i), qui relève de l'agronomie et de l'écophysiologie, est sous la responsabilité directe du chef de programme, agronome. Le point (ii), qui relève de la chimie et de procédés industriels est traité par l'UR CIRAD de Sylvie Mouras.

2.1 Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines

L'étude vise à estimer la quantité de CLD présente dans les différentes parties de la plante, y compris les racines, avec une évaluation de la fluctuation éventuelle en fonction des variétés et de l'âge de la culture. Il faudra, in fine, qu'il y ait le moins possible de CLD présente dans la biomasse brûlée. Le travail a consisté à mesurer le taux de contamination dans les sols et à évaluer les teneurs en CLD dans les différents entrenœuds des tiges afin d'estimer les quantités de CLD absorbées par la plante ainsi que les hauteurs de migration. Parallèlement, des mesures de teneurs en CLD dans le système racinaire ont été effectuées, afin d'avoir une première évaluation du transfert de la molécule du sol vers l'ensemble des composantes de la canne.

2.1.1 Matériel et méthode

Dispositif expérimental

Les mesures ont été faites sur deux des essais variétaux du Fromager (V3 et V4) décrits en paragraphe 1.21. Les sols sont de type andosol (MO : 7.6 %, pH eau : 6.1, teneur en azote total 2 à 3 mg/kg, P2O5 assimilable : 3.7 mg/100g) et la contamination par la chlordécone dans les 30 premiers centimètres de sol est représentative des contaminations de la zone. Sur chaque essai, les prélèvements destinés à l'analyse CLD ont eu lieu sur les deux meilleures variétés identifiées, à partir d'évaluations non destructives ainsi que sur le témoin R579, largement cultivé en Guadeloupe. Les deux variétés retenues sur l'essai V3 sont la TC8 et la F176 issues de la collection du Cirad Guadeloupe. Sur l'essai V4, les prélèvements ont eu lieu sur les variétés WI86015 et WI81456 qui proviennent du WICSCBS de Barbade.

Méthode d'étude

Evaluation des teneurs en chlordécone dans différentes composantes de la plante et de la hauteur de migration dans des cannes âgées de 8 et 12 mois

Sur chaque parcelle, à trois endroits différents, on a prélevé une canne en coupant à la base de la tige. Les cannes ont été placées sur une bâche pour éviter tout contact avec le sol. Sur chaque tige, on a séparé les parties dites tiges usinables et les parties sommitales. La limite était située à quatre nœuds en dessous du dernier ochréa visible. Les tiges ont ensuite été sectionnées de la manière suivante :

Entre-nœuds 1 à 5

Entre-nœuds 6 à 10

Entre-nœuds 11 à 20

Entre-nœuds >20

Suite aux résultats obtenus sur les essais V3 à 8 et 12 mois et sur l'essai V4 à 8 mois, montrant de fortes concentrations au niveau de la base des tiges, un compartiment supplémentaire des dix premiers centimètres des tiges aériennes (correspondant à la hauteur de coupe) a été évalué sur l'essai V4 à 12 mois.

Les parties souterraines des tiges correspondantes ainsi qu'un échantillon de racines superficielles situées dans un horizon de sol compris entre 0 et 20 cm ont aussi été prélevés.

Sur chaque parcelle, les tronçons de même position sur la tige ont ensuite été regroupés. On disposait donc de trois tronçons d'un même compartiment par parcelle, soit neuf tronçons de ce compartiment par variété. Les racines superficielles ont aussi été regroupées par variété sur un même bloc.

Chacun des échantillons a été rincé à l'eau de façon à enlever tout résidu de terre puis séché à l'étuve (60°C pendant 24 heures, puis 85°C pendant 48 heures) avant d'être pesé. L'augmentation de la température s'est faite progressivement pour éviter que le sucre contenu dans les tiges soit extrait sous l'effet de trop fortes températures. Les tronçons ont ensuite été broyés grossièrement puis finement (broyage 1 mm) en nettoyant bien l'appareil entre chaque échantillon. Le broyage a été effectué dans l'ordre croissant des teneurs en chlordécone, de l'extrémité des tiges à la base, afin d'éviter toute contamination du matériel.

Après avoir été débarrassées de toute trace de terre, les racines ont été pesées en frais puis mises à l'étuve à 60°C pendant 48 heures avant d'être repesées et broyées finement.

Evaluation des teneurs en chlordécone dans les parties souterraines et dans les bases des tiges dans des cannes âgées de 10 mois

Suite aux premiers résultats obtenus à 8 mois montrant une forte teneur en CLD dans les racines, l'objectif de cette manipulation était d'évaluer les teneurs en CLD des parties souterraines (racines grosses et fines, tiges souterraines) et de la base de la tige (dix premiers centimètres).

Sur chaque parcelle on a prélevé :

- La base des tiges aériennes entre 0 et 10 cm de la surface du sol
- Les tiges souterraines : entre la bouture et la surface
- Les racines rattachées aux touffes
- Quatre compartiments de sol, à deux distances et deux profondeurs différentes, contenant les racines grosses et fines des cannes.

La biomasse racinaire a été prélevée par la méthode des monolithes (Chopart, 1999, Chopart, 2004). Cette méthode a permis d'obtenir une estimation de la biomasse racinaire présente entre la surface et 30 cm de profondeur sur les 9 parcelles étudiées, dans le but d'évaluer les teneurs en CLD dans les racines et d'estimer les quantités de la molécule par unité de surface.

Dans l'interligne, quatre cubes de sol de 15 centimètres de côté ont été prélevés à deux distances du rang de canne, à deux profondeurs 0-15 cm et 15-30 cm (figure 12) et à deux distances par rapport au centre du rang:

- entre 18 à 33 cm (représentatif de l'espace entre 10 et 40 cm du rang)
- entre 53 et 68 cm (représentatif de l'espace entre 40 et 80 cm du rang)

Les racines situées à proximité immédiate du rang de canne, entre 0 et 10 cm de part et d'autre du rang et entre 0 et 15 cm de profondeur, ont été prélevées dans le monolithe de 15 cm de profondeur, 20 cm de largeur et d'environ 30 cm de long qui contenait la touffe de canne puis traitées comme les racines issues des monolithes.

Dans l'horizon sous-jacent, entre 15 et 30 cm de profondeur sous le rang de canne, la biomasse racinaire a été considérée comme identique à celle de la distance 18-33 cm à la même profondeur. Les racines dépassant du monolithe de sol, lors de l'extraction de celui-ci, ont été soigneusement sectionnées de façon à ne garder que celles contenues dans le volume étudié. Au total, 36 monolithes de sol de 15 cm d'arête ont été prélevés. Les racines ont été extraites des monolithes par tamisage (mailles de 2 mm) sous l'eau, puis lavées minutieusement afin qu'il ne reste aucune trace de terre (Chopart, 2004). Elles ont été séparées en deux catégories: racines fines (diamètre inférieur à 1mm) et racines grosses (photo 18). Elles ont ensuite été placées brièvement sur un papier absorbant pour éliminer la pellicule d'eau superficielle présente après lavage, avant d'être pesées. Enfin, les échantillons ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 48 heures. Les échantillons racinaires des trois répétitions d'une même variété ont été regroupés entre eux car la quantité de matière sèche n'était pas suffisante pour les analyses de Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) et les analyses chlordécone.

Ces mesures ont permis d'obtenir une estimation de la biomasse totale par unité de surface, pour des cannes plantées en rangs de 1.6 m. Pour cela, les résultats bruts obtenus à différentes profondeurs et distances du rang ont été pondérés en fonction de leur volume représentatif (figure 12). Un volume de 15 cm de large et de 80 cm de long, couvrant un demi-interligne sur 30 cm de long et 30 cm de profondeur a été considéré comme l'unité de base représentative, prenant en compte les gradients verticaux, transversaux et longitudinaux, sur 30 cm de profondeur. La biomasse racinaire (en t/ha) a été estimée à partir de cet espace représentatif. La biomasse racinaire située en dessous de 30 cm de profondeur n'a pas été évaluée. Evidemment, elle existe, mais les biomasses sont moindres ainsi que, à priori, les concentrations du sol en CLD.

Cette estimation a été réalisée afin de pouvoir calculer ultérieurement la biomasse racinaire en t/ha à partir des résultats obtenus sur les 30 premiers centimètres et d'évaluer les quantités de CLD en t/ha en fonction des différents compartiments étudiés.

Chaque échantillon de sol a été pesé directement après le prélèvement. Pour chaque bloc, un échantillon représentatif de 50 grammes a été prélevé pour les mesures d'humidité et un échantillon de 100 grammes a été prélevé pour l'analyse de chlordécone. L'échantillon de 50 grammes a été séché à l'étuve à 105 °C pendant 48 heures. Les échantillons de 100 grammes d'un

même traitement, issus de prélèvements de même profondeur ont été regroupés et envoyés au laboratoire pour analyse après séchage.

Un prélèvement de touffe comprenant la partie aérienne et la partie souterraine a été réalisé sur chaque parcelle. Les dix premiers centimètres des parties aériennes ont été séparés des parties souterraines. Les racines rattachées à la touffe ont été coupées et traitées comme des échantillons racinaires dits « près de la touffe ». Les échantillons ont été traités comme précédemment.

Traitement des échantillons

Des analyses SPIR ont été réalisées pour voir s'il existait, ou non, des relations entre la composition en fibre des échantillons et leur teneur en chlordécone.

L'ensemble des échantillons a été passé au Spectromètre (Spectrastar 2400) sous forme de fine poudre (1mm). Avant chaque phase de mesure, l'appareil a été testé avec un échantillon étalon (identique pour toute la durée du projet). La faible quantité de matière broyée a obligé à prendre des précautions spécifiques.

Les échantillons de sol et des différents compartiments de cannes ont ensuite été envoyés au Laboratoire Départemental de la Drôme (LDA 26), un des seuls en France à être agréé pour cette analyse. Les molécules recherchées lors de ces analyses sont la chlordécone et son dérivé le 5b hydro chlordécone. Les analyses ont été réalisées au moyen des méthodes CMO MT06 pour les échantillons de sol et par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse (HPLC/MS) pour les échantillons végétaux. Etant donné les très faibles teneurs en 5b hydro chlordécone, seuls les résultats de teneur en chlordécone seront présentés par la suite.

2.1.2 Résultats

Evaluation des teneurs en chlordécone dans les différentes composantes de la plante

Les teneurs en chlordécone du sol et des différentes parties aériennes et souterraines de quatre variétés de cannes fibres et de la variété témoin ont été déterminées à 8 et 12 mois et figurent dans les tableaux 19 et 20. Pour une meilleure lisibilité, les teneurs en CLD des tiges souterraines et des différents entrenœuds présentées dans le tableau 19 ont été reprises sous forme d'un graphique dans la figure 24. Les teneurs en CLD mesurées dans les échantillons de sol des deux essais sont élevées et représentatives des concentrations rencontrées dans les sols de la zone d'étude (tableau 19). Il existe un très fort gradient de concentration en CLD entre les racines et les parties supérieures des tiges sur les cannes âgées de 8 comme de 12 mois. A l'âge de 8 mois, la concentration en CLD dans les parties souterraines des tiges était située entre 15 (V4) et 55 fois (V3) supérieure à celle des premiers entre-nœuds aériens (tableau 19). Les racines avaient donc une teneur en CLD environ dix fois supérieure à celle des tiges souterraines et entre 200 et 500 fois supérieure à celle des parties basses des tiges, avec une valeur d'environ 7 à 9 mg/kg (tableau 19).

Tableau 19: Teneurs en chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 8 mois (a) et V4 à 8 mois (b). Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

(a)

(b)

| | R579 | TC8 | F176 | | R579 | WI86015 | WI81456 |
|--------------------|----------|----------|----------|--------------------|----------|-----------|-----------|
| Sol (0-20 cm) | 7087 (a) | 5963 (a) | 6233 (a) | Sol (0-20 cm) | 9817 (a) | 12140 (a) | 11420 (a) |
| Racines (0-20 cm) | 10565 | 8951 | 6136 | Racines (0-20cm) | 9092 | 7389 | 7992 |
| Tiges souterraines | 814 (a) | 955 (a) | 875 (a) | Tiges souterraines | 599 (a) | 441 (a) | 541 (a) |
| Noeuds 1-5 | 10,3 (a) | 23,3 (a) | 14,3 (a) | Nœuds 1-5 | 28 (a) | 35 (a) | 45 (a) |
| Noeuds 6-10 | 1,0 (a) | 2,0 (a) | 2,7 (a) | Nœuds 6-10 | 2,3 (a) | 4,7 (ab) | 6,3 (b) |
| Noeuds 11-20 | 1,3 (a) | 2,3 (a) | 4,0 (a) | Nœuds 11-20 | 6,0 (a) | 8,7 (a) | 8,3 (a) |

A 12 mois, les tiges souterraines de V3 et de V4 étaient 10 fois plus contaminées que les premiers entrenœuds des tiges aériennes. Les racines avaient des teneurs en CLD de 100 (V4) à 200 fois (V3) supérieures à celles des entrenœuds 1 à 5 (tableau 20). A l'âge de 8 mois comme de 12 mois, il y a donc un très fort gradient de concentration de CLD entre les racines, qui absorbent et stockent la CLD, et la partie basse des tiges (entre 200 et 500).

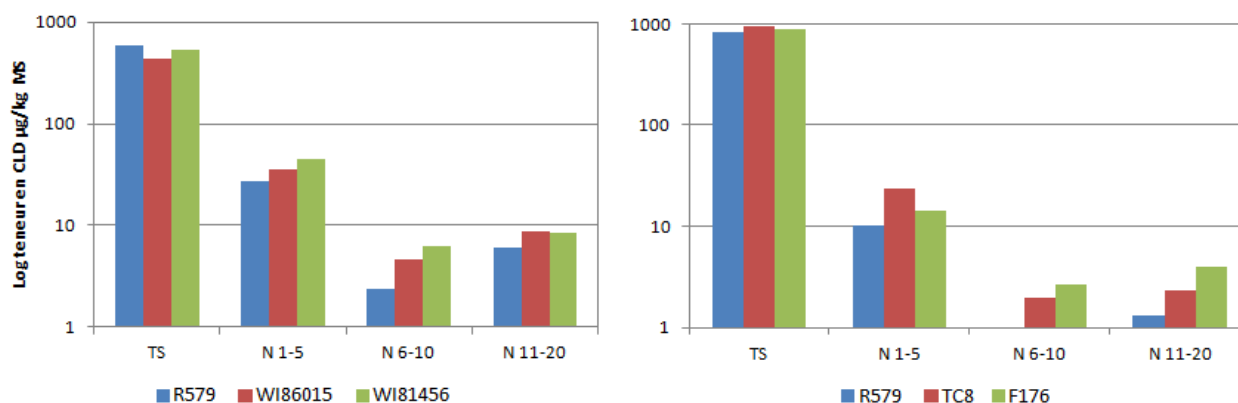


Figure 24: Teneurs en chlordécone (log µg/kg MS) dans les composantes des différentes variétés de cannes étudiées à 8 mois sur V4 à gauche et V3 à droite.

Tableau 20: Teneurs en chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 12 mois (a) et V4 à 12 mois (b). Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

(a)

(b)

| | R579 | TC8 | F176 |
|--------------------|----------|----------|---------|
| Sol (0-20 cm) | ND | ND | ND |
| Racines (0-20 cm) | 12574(a) | 10089(a) | 8491(a) |
| Tiges souterraines | 797(a) | 450(a) | 569(a) |
| nœuds 1-5 | 57(a) | 44(a) | 77(a) |
| nœuds 6-10 | 5,3(a) | 5,0(a) | 2,0(a) |
| nœuds 11-20 | 2,0(a) | 7,0(a) | 1,7(a) |

| | R579 | WI86015 | WI81456 |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Sol (0-20 cm) | ND | ND | ND |
| Racines (0-20 cm) | 7719 (a) | 4595 (a) | 6736 (a) |
| Tiges souterraines | 754 (a) | 675 (a) | 658 (a) |
| Base tiges (10 cm) | 358 (a) | 185 (a) | 195 (a) |
| Nœuds 1-5 | 117 (a) | 44 (a) | 38 (a) |
| Nœuds 6-10 | 12,7 | <5 | <5 |
| Nœuds 11-20 | <1 | <5 | <5 |

Il semblerait que les parties souterraines sont contaminées à des niveaux stables entre 8 et 12 mois (peu de différence entre les 2 dates pour un même compartiment), alors que les parties aériennes montrent une légère augmentation en teneur de CLD avec le temps. L'effet variétal est peu visible, y compris sur les parties aériennes.

Des résultats de teneurs en chlordécone, plus précis, obtenus sur les biomasses de trois variétés de cannes âgées de 10 mois (essai V4) restant sur ou dans le sol sont présentés dans le tableau 21.

Tableau 21 : Teneurs en chlordécone, en $\mu\text{g/kg}$ de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V4 à 10 mois. Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

| | | R579 | WI86015 | WI81456 |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Sol | 0-15 cm | 9192(a) | 7220(a) | 7900(a) |
| | 15-30 cm | 3103(b) | 11380(a) | 13543(a) |
| Racines fines | 0-15 cm | 28683 | 40287 | 30697 |
| | 15-30 cm | 49205 | 54914 | 60720 |
| Racines grosses | 0-15cm | 16313 | 11710 | 13291 |
| | 15-30cm | 21031 | 13756 | 18500 |
| Racines attachées touffe | | 10848(a) | 6172(a) | 5553(a) |
| Tiges souterraines | | 1012(a) | 1690(a) | 1017(a) |
| Bases tiges (10 cm) | | 449(a) | 358(a) | 190(a) |

Les teneurs en CLD du sol sont représentatives des teneurs rencontrées dans la zone. Il n'y avait pas de différence significative de teneurs en CLD entre les parcelles, excepté pour l'horizon 15-30 de la variété R579 qui a une concentration nettement inférieure à celles des autres parcelles et profondeurs, pour des raisons non élucidées et sans doute liées à la variabilité aléatoire de la teneur en CLD dans le sol et à l'histoire culturale. Il y a eu de forts écarts de concentration en CLD entre :

- les racines et la base des tiges aériennes avec un rapport moyen de 100 environ.
- les racines (fines comme grosses) situées dans l'horizon le plus profond (15-30 cm) et celles situées dans l'horizon 0-15 cm de profondeur.

Au sein de chaque horizon, il y a eu un gradient de concentration des racines fines vers les racines grosses (figure n°24). Les racines fines ont été, en moyenne, de deux à quatre fois plus contaminées que les racines grosses (tableau n°21).

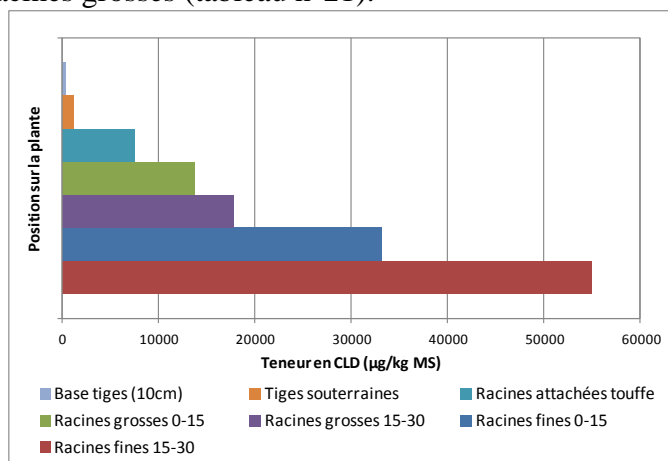


Figure 24: Gradient de concentration de la molécule de chlordécone dans les différentes composantes des parties restant au sol. Moyenne de 3 variétés de cannes (R579, WI86015, WI81456). Essai V4 à 10 mois.

Les racines constituent, forcément, la voie d'entrée prépondérante de la molécule dans la canne à sucre. D'après les résultats obtenus, la molécule semble pénétrer préférentiellement dans les racines fines. La molécule de CLD, absorbée par les racines fines, s'y fixe en grande partie ou transite ensuite vers les racines grosses avant d'arriver dans les parties aériennes. Parallèlement, il y a une diminution de teneur en CLD dans les racines, depuis les racines fines de l'horizon le plus profond jusqu'à celles situées à proximité immédiate des tiges, avec une teneur en CLD passant d'environ $50\,000\mu\text{g/kg}$ de MS pour les racines fines de profondeur à environ $7\,000\mu\text{g}$ pour les

racines situées à quelques centimètres de la tige (tableau 21). Ce gradient de contamination semble donc lié à la distance parcourue par la molécule depuis son point d'entrée dans la racine. La molécule de CLD se fixe sur des sites à forte affinité, rencontrés dans les racines et les différents compartiments, ce qui entraîne une diminution progressive de la concentration de CLD au cours de son trajet des racines vers les feuilles.

Ainsi, plus on s'éloigne de la source d'absorption, plus les concentrations en CLD sont faibles, et les parties aériennes ont des teneurs en CLD beaucoup plus faibles que celles des racines (tableau 21). De même, la CLD est restée localisée dans les premiers entre-nœuds c'est à dire sur 80 à 100 centimètres ; au-dessus les teneurs sont faibles, proche du seuil de détection et fluctuantes (tableaux 19 et 20).

Le système racinaire paraît donc agir comme un filtre sur la molécule de CLD. Ce rôle semble être lié à la longueur de celui-ci et à sa capacité de fixation. Cette fonction de filtre des racines expliquerait la faible concentration de la molécule dans les parties aériennes de la plante, même dans la partie basse des tiges.

La molécule de CLD semble donc être absorbée puis rapidement fixées par les racines.

Relation entre la teneur en chlordécone du sol et celle de la plante

Comme déjà indiqué, la teneur moyenne en CLD mesurée dans le sol n'a pas été significativement différente d'une parcelle à l'autre sur un même essai (tableau 19). Les échantillons de sol prélevés sur l'essai V4 à 8 mois ont eu des teneurs en CLD plus élevées que celles de l'essai V3, mais cela ne s'est pas répercuté de façon proportionnelle dans les racines et parties aériennes des cannes (tableau 19). Par exemple, la teneur en CLD du sol du traitement « TC8 » de V3 a été la moitié de celle du traitement « WI86015 » de V4 ; et pourtant les teneurs en CLD des tiges souterraines du traitement « WI86015 » ont été seulement la moitié de celles du traitement « TC8 » (tableau 19).

Cette absence de proportionnalité entre les teneurs en CLD du sol et de la plante peut s'expliquer à la fois par la variabilité spatiale des teneurs en CLD dans le sol et par l'importance de l'extension du système racinaire de la canne. En effet, le système racinaire absorbe de la CLD dans un volume de sol nettement supérieur à celui situé dans le proche voisinage du pied où les prélèvements ont été réalisés. Il n'est donc pas surprenant de ne pas trouver, dans les résultats obtenus à l'échelle métrique, une relation directe entre la concentration en CLD du sol et celle de la plante. A une échelle différente (are, hectare) cette relation existe (Cabidoche et *al.*, 2011). Dans ces conditions, les différences de concentrations en CLD entre variétés doivent être examinées avec prudence.

Les teneurs en CLD des racines ont été supérieures à celles du sol environnant (tableaux 19 et 21), les deux étant exprimées en matière sèche. Cependant, les racines vivantes ont une humidité de plus de 80 %, alors que l'humidité pondérale du sol est d'environ 20 à 30 % ce qui diminue, in situ, leur concentration au contact du sol humide. En fait, dans le sol, la concentration en CLD du sol humide était donc supérieure à celle des racines, mais avec de faibles écarts. Il ne paraît donc pas y avoir, chez la canne à sucre, de bioconcentration de la CLD.

Relation fibres/chlordécone

Les différences de concentrations entre les différentes parties de la plante et entre les variétés peuvent, à priori, s'expliquer par la composition des tissus. D'après certains auteurs (Lesueur-Jannoyer et al, 2011), il semblerait que, plus la teneur en fibres de la plante est grande, plus la CLD est retenue dans les parties basses. Lors de son passage dans le flux de la sève brute, la molécule de CLD semble se fixer sur des tissus fibreux, à forte affinité, en créant un gradient de concentration.

En Guadeloupe, il semble y avoir une tendance négative entre la teneur en fibres et la teneur en CLD (figure 25). Ceci peut en partie s'expliquer par le fait que les teneurs moyennes en CLD des racines grosses (15µg/g MS) étaient plus faibles que celles des racines fines (44µg/g MS) malgré une teneur moyenne en fibres un peu plus importante dans les racines grosses que dans les racines fines (76 % contre 68 %). Sur la figure 25, il existe donc, en fait, deux populations : celle des racines grosses à forte teneur en fibres et « faible » teneur en CLD et celle des racines fines à caractéristiques inversées, sans effet notable des variétés.

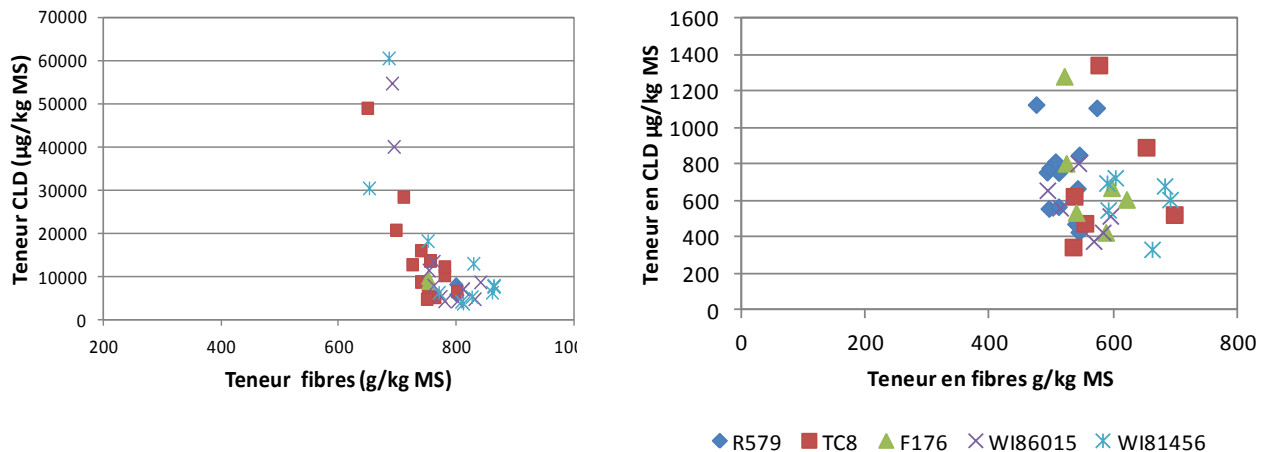


Figure 25 : Relation entre contamination en chlordécone et teneurs en fibre des parties souterraines. A gauche : racines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8,10 et 12 mois). 42 données. $R^2=0,5$. A droite : tiges souterraines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois et 12 mois).

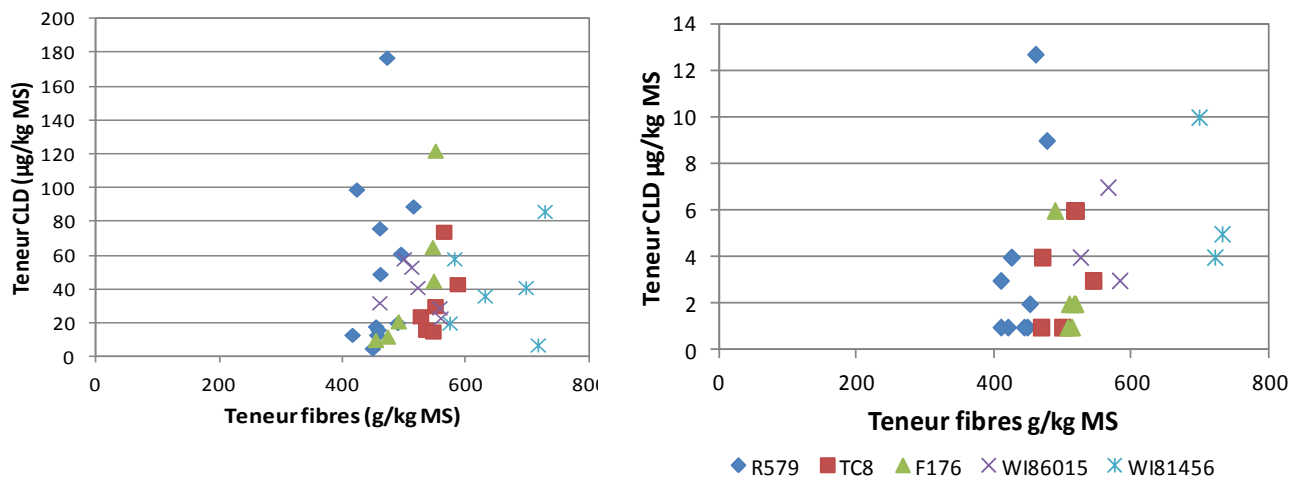


Figure 26 : Relation entre contamination en chlordécone des entrenœuds et teneurs en fibres des entrenœuds. A gauche : entrenœuds 1 à 5, 36 données. A droite : entrenœuds 6 à 10, 28 données. Données issues des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois et 12 mois).

En revanche, dans les tiges souterraines ou aériennes, la forte variabilité de teneur en CLD ne s'explique pas par la variabilité de teneurs en fibres (figures 25 et 26).

Concernant les variétés, il ne semble pas y avoir de relation claire entre les teneurs en CLD et en fibres dans les tiges aériennes et souterraines, même pour la variété WI81456 qui a un taux de fibres supérieur, sans effet sur la teneur en CLD. De même, la variété R579 la moins fibreuse ne concentre pas moins de CLD que les autres (figure 26). Les teneurs en fibres totales ne permettent donc pas d'expliquer, à elles seules, les gradients de CLD.

Evolution des teneurs en chlordécone dans les différentes composantes de la biomasse entre 8 et 12 mois

Sur l'essai V3, comme sur l'essai V4, les teneurs en CLD dans les racines et dans les tiges souterraines varient très peu entre 8 et 12 mois. (Figure 27).

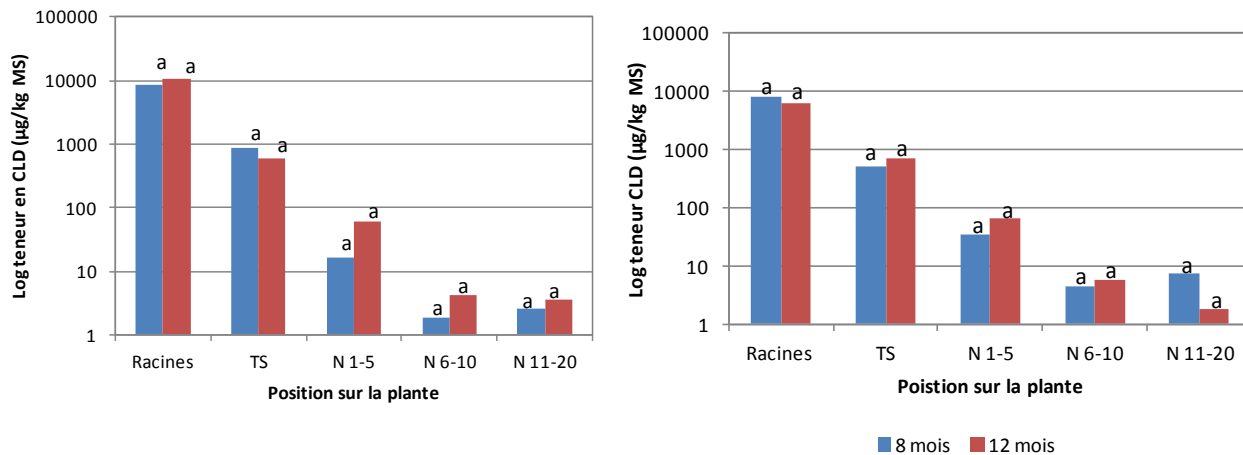


Figure 27: Evolution des concentrations en chlordécone (en µg/kg de PS, échelle logarithmique) dans les différents compartiments des cannes étudiées entre 8 et 12 mois. A gauche : essai V3. A droite : Essai V4.

Les faibles valeurs de CLD dans les parties supérieures des tiges rendent les résultats difficiles à analyser. Néanmoins, sur les deux essais, entre ces deux dates, il y a eu une augmentation de la concentration de la CLD dans les entrenœuds 1 à 5 (figure 27).

Il semble donc exister, entre 8 et 12 mois, une certaine modification des teneurs en CLD le long des tiges, la concentration dans les racines restant, elle, plus ou moins constante. Cette modification peut avoir plusieurs origines (accumulation avec le temps, augmentation de la concentration de CLD dans la sève, etc.) et des études plus ciblées sur ce point seront nécessaires pour trouver et prouver les causes.

Estimation des quantités de chlordécone par unité de surface cultivée

La transformation des concentrations de CLD par poids sec en quantités de CLD par unité de surface de culture (figure 28) vise à mieux cerner les risques environnementaux liés à cette molécule. Les valeurs ont été obtenues à partir des concentrations par unité de biomasse et de la biomasse par m². Pour les racines, on a transposé, à 8 mois, des valeurs de biomasse racinaire par unité de surface au sol obtenues à 10 mois sur l'essai V4.

La quantité de CLD localisée dans les racines d'une culture de canne à sucre a été d'environ 25g/ha. Cette quantité de CLD contenue dans les racines a été très nettement supérieure à celle des tiges souterraines, qui ont concentré 1g de CLD par hectare de culture, et encore plus à celle située dans les tiges aériennes (environ 0.036 g/ha).

Bien que la biomasse des racines soit nettement inférieure à celle des parties aériennes de canne à sucre, elle constitue le compartiment dans lequel est stockée la plus grande quantité de CLD. Ainsi, la CLD absorbée par la canne à sucre reste, dans sa plus grande partie, dans le sol.

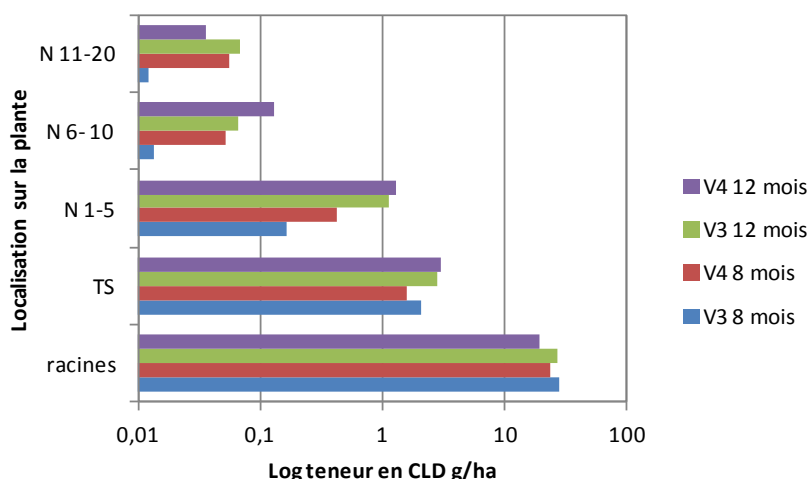


Figure 28 : Essais V3 et V4. Teneurs en chlordécone (en g/ha, échelle logarithmique) dans différentes parties de la plante sur des cannes âgées de 8 mois et 12 mois.

2.1.3 Discussion et conclusion

Une étude assez proche a été menée à la Martinique sur des cannes âgées de 8 mois cultivées en pots. Les résultats récents (Cabidoche et al, sous presse) font état de teneurs dans les tiges plus élevées qu'en Guadeloupe dans les premiers entrenœuds. Ces différences peuvent s'expliquer par les conditions expérimentales, en particulier le fait qu'à la Martinique l'étude a été faite en pots et en Guadeloupe en conditions de plein champ. Néanmoins, dans les deux cas, il existe un fort gradient de concentration important depuis les racines jusqu'à l'extrémité supérieure des tiges. En tenant compte de ces différences de conditions expérimentales, les résultats du programme REBECCA sont donc à la fois concordants et complémentaires de ceux obtenus à la Martinique.

En Guadeloupe (programme REBECCA) comme à la Martinique (Cabidoche et al., 2012), les résultats les plus innovants concernent la concentration de CLD dans la partie souterraine des tiges et les racines. En effet, de par leur longueur, elles semblent jouer un rôle de filtre de CLD. Mais les racines restant dans le sol, la CLD racinaire n'est pas exportée. Les parties aériennes les plus contaminées, c'est-à-dire les dix premiers centimètres des tiges aériennes, restent elles aussi sur la parcelle, puisqu'elles sont situées sous le niveau de la coupe.

Les parties sommitales des tiges et feuilles adhérentes (vertes et sèches) sont aussi considérées, actuellement, comme de la biomasse combustible. Partant des résultats obtenus sur la répartition de la CLD sur l'axe de la tige, la teneur moyenne en CLD des feuilles peut être estimée comme étant relativement faible. Jannoyer et al. (2011) citent des teneurs en CLD inférieures à $1\mu\text{g/kg}$ de matière fraîche dans les feuilles vertes, soit approximativement, $3\mu\text{g/kg}$ de matière sèche en considérant une teneur moyenne en matière sèche des feuilles vertes de 30% (Chopart, 2012). Cette teneur est cent fois plus faible que celle mesurée dans les dix premiers centimètres des tiges aériennes ($332\mu\text{g/kg MS}$). En Guadeloupe, au vu de ces premiers résultats obtenus à la Martinique et pour des raisons budgétaires, aucune analyse de CLD n'a été effectuée sur les feuilles.

D'un point de vue pratique, les composantes de la biomasse les plus contaminées par la CLD n'étant pas exportées, les quantités de CLD brûlées lors de la combustion seront donc relativement faibles, ce qui limitera l'impact environnemental de cette filière.

D'un point de vue plus scientifique et générique, les résultats concernant les racines de cinq variétés de cannes en première année de plantation, ouvrent la voie à une compréhension et à une modélisation du transfert de la CLD dans le système sol-eau-plante. Ils doivent toutefois être confirmés en repousse.

2.2 Combustion en laboratoire de tiges de canne à sucre contaminées par la chlordécone

(Sylvie Mouras, Benoit Lebert, Cirad)

Les deux objectifs principaux de cette étude sont de déterminer :

- les comportements en combustion de la canne contaminée et de la chlordécone (CLD) seule, afin de les comparer,
- la répartition des polluants dans les différents produits de combustion (les cendres et les effluents gazeux).

Il faut toutefois souligner que les analyses ne sont que qualitatives et que les conditions expérimentales du montage sont spécifiques à celui-ci. Les résultats obtenus ne sont pas représentatifs de ce qui se passe en chaudière. Il s'agit donc d'une estimation des produits de combustion, qu'il faudra extrapoler avec prudence.

2.2.1 Analyse des cendres après combustion dans un four à moufle à différentes températures

Le but était de brûler en présence d'oxygène des échantillons de cannes contaminées puis de récupérer les cendres et analyser leur teneur en chlore. La canne non contaminée sert ici de témoin.

Le chlore mesuré dans ces cendres provient de *deux sources différentes* :

- le chlore provenant du sol où la canne a poussé, nécessaire à la croissance de celle-ci,
- le chlore présent dans la molécule de la chlordécone, dû à la contamination des sols par ce pesticide.

Le tableau 22 représente brièvement les différents résultats obtenus.

En premier lieu, nous constatons qu'environ 7 à 18% du chlore présent dans la canne reste dans les cendres à 550°C, et qu'il reste environ 1 à 7% de chlore dans les cendres à 700°C. Les taux de chlore des cendres ne sont *pas représentatifs* de la présence de chlordécone : il y a dans la canne environ 1 000 à 100 000 fois plus de chlore venant du sol que de chlore venant de la CLD.

En effet les taux de chlore initiaux des cannes à sucre contaminées sont élevés : de 0.25 à 1.5% . Par exemple, la canne à sucre ayant une teneur en chlore de 1,5% est sensée être une des cannes les moins contaminées parmi les échantillons disponibles. Une comparaison du taux de chlore des cendres avec la quantité initiale de CLD est donc impossible pour tirer des conclusions sur le comportement de la CLD et la répartition de ces produits de combustion.

Tableau 22 Résultats d'analyse des cendres

| | Taux de CLD (µg/kg) | Taux de Chlore calculé du à la CLD (%) | Taux de chlore mesuré de la canne (%) | Taux de chlore des cendres à 550°C rapporté à la canne initiale (%) | Chlore restant dans les cendres à 550°C (%) | Taux de chlore des cendres à 700°C rapporté à la canne initiale (%) | Chlore restant dans les cendres à 700°C (%) |
|-----------------------------|---------------------|--|---------------------------------------|---|---|---|---|
| Canne à sucre témoin | 0 | 0 | 0,246 | 0,047 | 18,95 | 0,0032 | 1,29 |
| Canne s à sucre contaminées | 104 | 0,00000748 | 0,837 | 0,109 | 13,03 | 0,0624 | 7,45 |
| | 151 | 0,00001094 | 1,486 | 0,248 | 16,68 | | |
| | 190 | 0,00001371 | 0,615 | 0,056 | 9,10 | | |
| | 227 | 0,00001643 | 0,816 | 0,128 | 15,68 | | |
| | 426 | 0,00003079 | 0,925 | 0,162 | 17,58 | | |
| | 591 | 0,00004267 | 0,588 | 0,043 | 7,24 | 0,0143 | 2,43 |

2.2.2 Analyse des gaz de combustion dans un four à cuillère et analyse des produits de combustion

Dispositif expérimental

Le dispositif initial utilisé est prévu pour la pyrolyse. Il a fallu améliorer plusieurs points avant de pouvoir arriver à une combustion encore incomplète :

- Combustion à l'oxygène pur pour favoriser la combustion et non la pyrolyse
- Augmentation du temps de séjour des fumées dans le four, en décalant la position de la nacelle contenant l'échantillon vers l'extrémité du tube. La biomasse est alors brûlée à une température inférieure à la consigne du four comme le montre la figure 29 mais les fumées sont brûlées à la température voulue. Après beaucoup d'essais et de réglages, la combustion est meilleure mais de nombreux produits de combustion incomplète sont présents : des goudrons, des produits pyrolygneux (d'où la différence de ce dispositif avec une vraie chaudière)

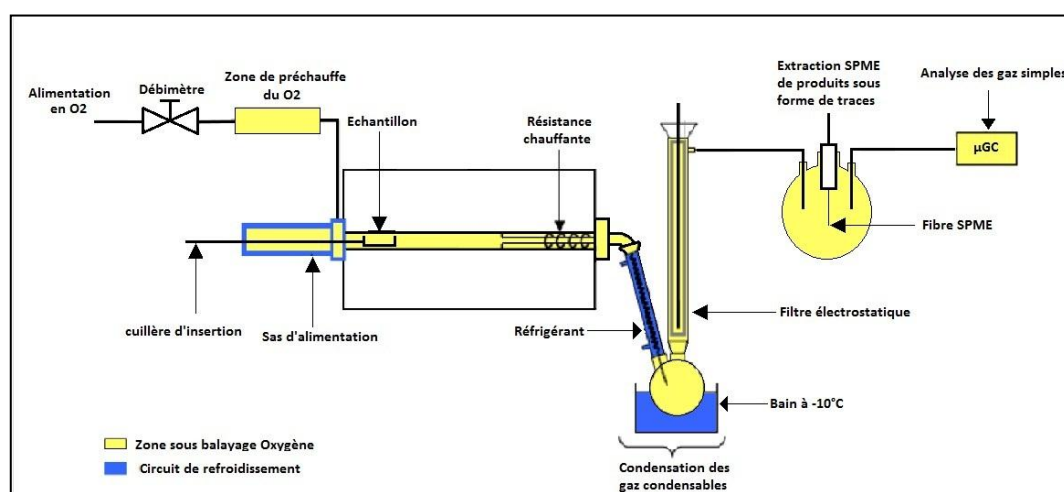


Figure 29. Schéma du dispositif expérimental de combustion.

Essais de combustion et analyses

Une méthode d'analyse spécifique a été développée : la SPME (Solid Phase Micro Extraction). Cette méthode consiste à mettre en contact une fibre recouverte d'un certain polymère, avec les composés recherchés. Ces composés sont alors extraits par *adsorption*, sans solvant, à partir d'échantillons solides, liquides ou gazeux, même à l'état de traces. Il existe différents polymères, ayant plus ou moins d'affinités avec certaines familles de composés. La fibre choisie pour nos expériences est la PDMS (polydiméthylsiloxane).

Après de nombreux essais avec des cannes plus ou moins contaminées, aucun produit chloré n'est identifié. La question de l'efficacité de cette nouvelle méthode est alors discutée et des essais sur la chlordécone seule sont alors envisagés. Ces essais se révèlent concluants et l'on a pu dégager plusieurs familles de composés de dégradation de la chlordécone en fonction de la température :

- Les premiers essais sont effectués dans un ballon chauffé au bec benzène (température non précise : environ 400/500°C) produits identifiés : de l'hexachlorocyclopentadiène (HCCP) en grande majorité. Sont également présents : des polychlorocyclopentadiène avec des groupes de cétones, d'amines et des polychlorobenzène (PCB) en petite quantité.
- Les essais dans le four à cuillère, à 650°C : des PCB en grande majorité, et de l'HCCP en petite quantité. A 800°C : des polychlorophénol et des polychlorobiphenyl.

La méthode d'analyse étant prouvée, d'autres essais ont été faits sur des *cannes* recontaminées avec de la chlordécone, pour obtenir des concentrations plus élevées que les échantillons disponibles (25 et 50 fois plus) et pouvoir détecter les produits de combustion. Un produit est alors identifié : le chloronaphtalène. Le naphtalène est issu de la combustion incomplète de la canne. Cependant, après combustion de canne à sucre témoin (non contaminée), le chloronaphtalène est également retrouvé dans les produits de combustion.

Nous pouvons donc en conclure que le chlore venant s'attacher au Naphtalène n'est pas forcément issu que de la chlordécone, mais vient également (et en majorité) du chlore issu de la canne.

2.2.3 Conclusions partielles

L'hypothèse de départ était que l'analyse du chlore dans les cendres ou des produits chlorés dans les fumées pouvait nous servir de marqueur des produits issus de la combustion de CLD, étant donné que la canne à sucre contient généralement peu de composé chloré naturellement. En fait, il s'est avéré que les échantillons en notre possession contiennent une quantité très importante de chlore en très large excès par rapport à la quantité de CLD présente dans les échantillons (de l'ordre de 10 000 fois plus). Le chlore ne peut donc pas servir de marqueur des produits de combustion de la CLD, et il n'a pas été possible dans cette partie de conclure sur la présence de produits issus de la CLD dans les cendres ou dans les fumées.

Ces essais de combustion et les analyses des fumées nous ont permis de tirer les enseignements suivants :

- La nature des produits de dégradation thermique de la CLD est très dépendante de la température. Il est donc très difficile de prédire ce qui se passera en chaudière où les conditions de température et de temps de séjour peuvent être différentes et variables dans le foyer.
- La combustion de canne a donné un composé chloré : le chloronaphtalène, qui n'est pas présent dans les produits de combustion de la CLD. Le naphtalène est un sous produit issu de la combustion incomplète (de la pyrolyse) de la biomasse. Il y aurait donc des recombinaisons entre les goudrons et le chlore présent dans les fumées, quelle que soit sa forme ou sa provenance.
- Comme pour la première partie, la présence de ce composé chloré ne peut pas être associée à la présence de CLD, dans la mesure où le chlore est présent dans la canne en très large excès par rapport à la quantité de CLD. Le chloronaphtalène a également été identifié dans les produits de combustion de la canne témoin non contaminée. Il n'a pas donc pas été possible de conclure sur la nature des produits de combustion de la CLD dans la canne.

2.3 Teneur des cendres en chlordécone après combustion en chaudière industrielle de bagasse de canne à sucre contaminée.

(Jean-Louis Chopart, Pauline Marie)

Les cendres qui seront issues de la combustion de la canne combustible ont vocation à être épandues sur le sol, en priorité sur les champs de culture de canne combustible, pour servir de fertilisant. En effet, une première étude faite à la Réunion (Chabalier et Babamoussa, 1999) a montré que les cendres issues de bagasse brûlée à l'usine du Gol contient en moyenne 3,1 % de potasse (K₂O) et 1 % de phosphore (P₂O₅), avec une variabilité qui peut dépendre des réglage de l'usine. Ces éléments sont sous une forme peu soluble, mais des apports de cendre ont quand même permis d'augmenter la production de ray-grass cultivé en pot (Chabalier et Babamoussa, 1999). Des résultats proches ont été obtenus plus récemment (Cabidoche et al. 2000). Ces auteurs

ont montré que les cendres de canne à sucre en provenance de l'usine du Moule contenaient : 6% de CaO, 4 à 5% de potasse et 1 à 2 % de P₂O₅. Leur teneur en métaux lourds est faible et n'entraîne pas de risque pour l'environnement. Un test fait sur igname et maïs a montré que ces cendres peuvent avoir un effet positif sur les rendements.

Mais, dans la zone polluée à la chlordécone (CLD), il ne faudrait pas que ces cendres soient un élément de dispersion de celle-ci dans les terrains agricoles. Il a donc paru utile, d'étudier le devenir de la CLD dans les cendres lors de la combustion de la canne dans des conditions proches de celles de la future canne combustible cultivée sur un sol pollué à la CLD.

Toutefois, la canne combustible n'est pas encore disponible en quantité suffisante pour une étude en vraie grandeur. Celle-ci a été menée en utilisant de la bagasse de canne à sucre conventionnelle, produit proche mais pas identique de celui qui sera brûlé dans la phase industrielle de production d'électricité à partir d'une canne cultivée pour cet usage. Néanmoins, cette étude visait à obtenir des premiers éléments de réponse provisoire pour la canne entière et consolidés pour la bagasse de canne à sucre.

Pour cela, de la canne à sucre issue du site du Fromager, cultivée sur une parcelle à teneur en CLD élevée (10,9 mg/kg de matière sèche) a été récoltée et plusieurs dizaines de tonnes de cette canne ont été envoyées dans une distillerie pour être traitées suivant le processus industriel habituel.

Au cours du processus, des échantillons de bagasse ont été prélevés juste avant combustion pour analyse des teneurs en fibres et de CLD. Ensuite, après combustion industrielle, un échantillon de cendres du même lot de bagasse a été récupéré, pour analyse.

La teneur moyenne en CLD mesurée dans les quatre échantillons de bagasse prélevés a été d'environ 60 µg/kg de matière sèche. Cette valeur est trois fois plus élevée que celle retrouvée dans les tiges de canne à sucre sur un autre terrain contenant moins de chlordécone (25 µg/kg de matière sèche en moyenne (Marie et Chopart, 2012a)). Cela peut en partie s'expliquer par la plus faible teneur en sucre de la bagasse (10% de la MS contre 34% pour les tiges) et donc la plus forte teneur en fibres. En effet, le sucre de canne ne contient pas de CLD (Clostre et al., 2012). Cela peut aussi en partie s'expliquer par une teneur en CLD plus faible (8 mg/kg en moyenne) dans le sol des expérimentations où les teneurs en CLD des tiges ont été mesurées (tableau 19).

Les cendres de combustion de la bagasse contaminée n'ont présenté aucune trace détectable de CLD (Marie et Chopart 2012b). Ce résultat n'est pas surprenant, puisque la combustion s'est faite à une température (environ 1000°C) nettement supérieure au point de sublimation de la CLD (350°C). Ces résultats, obtenus en condition réelle (industrielle), confirment donc ceux obtenus au laboratoire (par. 2.21).

Même si le produit utilisé (bagasse) n'est pas identique à celui qui sera brûlé dans la phase industrielle de production d'électricité, cette étude a permis d'obtenir des premiers éléments de réponse sur un éventuel retour au sol de la CLD lors de l'épandage des cendres (pour servir de fertilisant). Les résultats, à cet égard, sont clairs. Ils pourront être de nouveau confirmés avec des cendres issues des cannes entières fibreuses, quand celles-ci seront disponibles en quantités suffisantes, mais il n'y a pas de raison que le résultat soit différent.

Les résultats obtenus sur les cendres de bagasse de canne à sucre cultivée en milieu chlordéconé offrent des premiers éléments de réponse sur les teneurs en CLD dans ces cendres.

Ces cendres pourraient donc, à priori, être valorisées par épandages sur les parcelles de canne à sucre, en priorité dans les systèmes de canne combustible d'où elles proviennent. Les doses, modalités et conditions de ces épandages de cendres issues de cannes combustibles restent à être définies en phase 2.

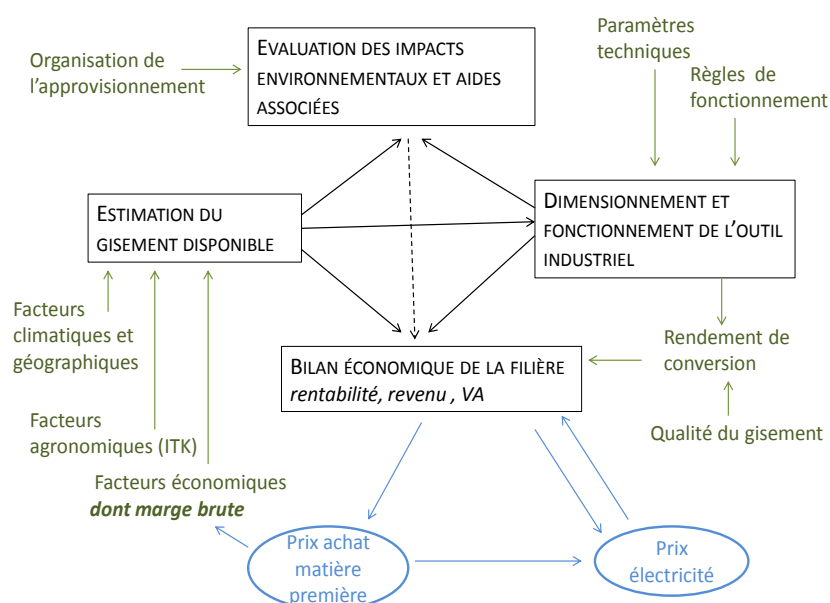
3. VOLET ÉCONOMIE ET ENVIRONNEMENT

Avertissement :

- 1 Pour faciliter la lecture, le n° des tableaux et figures de ce troisième volet recommence à 1.
- 2 Les textes des 4 parties du volet économie et environnement sont issus de 4 rapports séparés :
 - Bilionière M 2011 Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Eléments économiques : état des lieux et marges à générer pour rendre la spéculation attrayante pour l'agriculteur. Mémoire de MasterII UAG. Dir mémoire P Borda, co Dir JL Chopart, 80 p.
 - Blazy JM, Causeret F, Chopin P, Diman JL, Guindé L 2012 Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de biomasse issue de canne à fibres à Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe" Rapport final d'exécution d'assistance technique INRA 60 p.
 - Lejars C, Fusillier, JL, 2012 Faisabilité économique de la mise en place d'une unité de production d'électricité à partir de biomasse canne. Note scientifique REBECCA 40 p
- Outils d'analyse et premiers résultats.
- Merle T 2012. Estimation de l'impact environnemental d'une future filière canne à sucre dédiée à la production d'électricité Premiers résultats provisoires. Note scientifique REBECCA 10p

Le texte ci-dessous est une version contractée de ces rapports. Il ne contient donc pas tous les éléments. Néanmoins chacun de ces quatre rapports est joint au dossier de la production du programme REBECCA en phase 1 et en fait donc partie intégrante.

Le volet économie et environnement du programme a mis en œuvre 4 composantes complémentaires. La démarche générale mise en place dans le cadre de ce volet s'organise autour de quatre parties : (i) l'acceptabilité par les planteurs et l'estimation du gisement, (ii) le dimensionnement de l'outil industriel et la fixation du prix de l'électricité, (iii) l'évaluation de la rentabilité financière de la filière dans son ensemble et (iv) l'évaluation environnementale. Ces quatre actions d'études économiques et environnementales de la phase les connexions entre elles sont représentées schématiquement dans l'organigramme ci-dessous



Organisation du volet économie et environnement de la phase I du projet (C lejars et JL Fusillier, 2012)

Dans cet organigramme, on voit aussi les connexions avec le volet agro-variétal qui contribue à l'estimation du gisement disponible à travers les rendements de canne énergie en fonction des facteurs agro-variétaux et climatiques. Ce volet contribue aussi à la définition de la qualité du gisement (PCI, humidité, etc.)

L'étude du volet économique a commencé, en mars 2011, par un stage de master de l'UAG. Ce travail a permis de jeter les premières bases des estimations du gisement des surfaces potentiellement disponibles pour la canne combustible dans la commune de Capesterre-Belle Eau et sur les prix à payer aux producteurs et d'orienter en partie les recherches ultérieures.

Ce volet comprend donc 4 parties

- 1) Stage de Master2 en économie à l'UAG dans le cadre du programme REBECCA
- 2) Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de la biomasse issue de cannes fibres (Agro-économistes de l'INRA Guadeloupe)
- 3) Analyse de la rentabilité de la nouvelle filière (Agro-économistes CIRAD)
- 4) Analyse de cycle de vie (ACV) et bilan carbone

Ces quatre actions complémentaires sont présentées ci-dessous en commençant par la plus ancienne, qui a permis de défricher le sujet.

3.1 Premières études préliminaires en 2011: Etat des lieux.

(Maurice Bilonière, UAG)

Les premières études ont été faites par Maurice Bilonière dans le cadre d'un stage de Master2 de l'UAG de mars à juillet 2011. Le sujet était : « Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Eléments économiques : état des lieux et marges à générer pour rendre la spéculation attrayante pour l'agriculteur ».

Ce travail, fondé sur des données bibliographiques et des entretiens avec des acteurs et encadré par le chef de programme, a permis de jeter les premières bases des estimations : (i) sur le gisement des surfaces potentiellement disponibles pour la canne combustible, (ii) sur les prix à payer aux producteurs, (iii) sur la capacité de production d'électricité en liaison avec le gisement potentiel. La conclusion du mémoire est reprise ci-dessous.

Nous avons débuté ce mémoire par la présentation de nombreuses conditions d'ordre sociales, environnementales, énergétiques et économiques qui ont favorisé l'émergence d'un projet de recherche REBECCA. Ainsi, nous avons pu constater que dans le contexte actuel, cette nouvelle production agricole pourrait être bénéfique sous plusieurs angles. Sur le plan environnemental, il permettrait de résoudre des problèmes liés à l'utilisation de la chlordécone d'une part et à l'utilisation des énergies fossiles d'autre part. Au niveau énergétique, il permettrait de faire face à l'augmentation de la consommation électrique prévue pour 2020 alors que du point de vue économique il constituerait une alternative intéressante aux agriculteurs actuellement trop éloignés de la sucrerie de Gardel. Cependant l'émergence de la filière canne-énergie s'accompagne de conditions qu'il faudrait respecter, en particulier la disponibilité suffisante en terrains agricoles dans le sud Basse-Terre et un intérêt suffisant de la part de l'agriculteur, notamment (mais pas exclusivement) au niveau de l'attractivité économique.

Ces deux paramètres sont étroitement liés entre eux et ils dépendent également d'un facteur commun : l'agriculteur. En effet, le niveau de revenu généré par la filière est un facteur d'intérêt incontournable pour tout individu rationnel tel que l'agriculteur. Si les revenus sont suffisamment intéressants pour ce dernier, il s'orientera vers la nouvelle filière ce qui signifie qu'il mettra ses parcelles à disposition de cette dernière. En revanche, dans le cas contraire, le développement d'une telle filière serait inconcevable. Nous nous sommes donc focalisés sur ces deux principales conditions liées au programme Cann'elec. Nos estimations tirées de plusieurs sources montrent que dans la zone sud Basse-Terre (communes de Goyave, Capesterre-Belle-

Eau, Trois-Rivières, Vieux-Fort, Gourbeyre, Basse-Terre, Baillif, Saint-Claude et Vieux-Habitants) les surfaces actuelles en canne-à-sucre (hors canne à rhum) sont de l'ordre de 200 ha. Il existe des surfaces en jachère d'environ 900 ha qui sont pour la plupart intégrées en rotation dans des systèmes de production basés sur la banane. Même en ayant l'accord de la plupart des agriculteurs cannières et bananiers il se pourrait que les surfaces disponibles pour la production de canne énergie n'atteignent pas les 1100ha nécessaires à l'implantation d'une unité de production électrique de 10MW tel que défini par le programme. Par conséquent, dans le contexte des analyses de notre étude, il faudrait peut-être s'orienter vers l'implantation d'une unité de production électrique d'une puissance moindre qui optimiserait, au moins dans un premier temps, les productions de canne énergie. Concernant le niveau de revenu à générer pour que la filière soit attrayante pour l'agriculteur, nous avons effectué une première approche au cours de ce Mémoire en se basant sur le niveau de revenu généré par la filière canne-à-sucre dans la zone sud Basse-Terre.

Il en ressort que pour être aussi attrayante que la canne-à-sucre (environ 3500€/ha/an dans nos hypothèses de calcul (en particulier : 98 t/ha et pas de coût de foncier), il faudrait que le prix d'achat de la canne-fibre soit compris entre 55€ et 44€/t de Matières Fraîches pour des rendements annuels moyens compris entre 130t/ha et 180t/ha de biomasse totale. Il est à noter que ces niveaux de prix calculés sont très nettement inférieurs à ceux de la canne-à-sucre (69€/tc). Ceci est dû à un niveau espéré de rendement de la canne fibre supérieur à celui de la canne à sucre, avec des augmentations de coûts de production moins que proportionnels.

Les premiers résultats obtenus au cours de cette étude constituent une base, un préliminaire indispensable à l'enrichissement des connaissances actuelles, plutôt limitées, sur le développement d'une filière canne-énergie. Il est donc prévu que ces travaux soient approfondis à court terme suivant différents axes :

- élargissement de la quantification des surfaces agricoles actuelles en intégrant la commune de Petit-Bourg. Dans la mesure où cette commune est proche de la zone sud Basse-Terre, il serait intéressant de voir les possibilités supplémentaires qu'elle offrirait en termes de surfaces potentiellement disponibles pour le développement de la canne-énergie.

- prolongement de l'approche agriculteur en calculant un prix d'achat de la canne-fibre en partant du niveau de revenu généré par un hectare de banane. Si la canne-à-sucre est une des principales cultures de la zone sud Basse-Terre, la banane demeure la principale culture de cette zone. Il serait donc intéressant de savoir à quel niveau de prix d'achat de la canne-fibre le revenu généré par la filière deviendrait comparable à celui de la filière banane.

- adoption d'une approche plus industrielle en calculant un prix d'achat de la canne-fibre partant du prix actuel du kWh en Guadeloupe. Ceci permettrait une comparaison des différents prix d'achat obtenus à l'aide des deux approches (producteur et industrielle) et, in fine, de déterminer le prix d'achat de la canne-fibre pour rendre toute la filière attractive.

A moyen terme, des travaux et outils plus sophistiqués devraient être entrepris pour les consolider et élargir la connaissance de la filière et de son intérêt économique. Ces travaux ultérieurs devraient intégrer de la modélisation afin, en particulier, de bâtir des scénarios intégrant les variations futures des paramètres économiques, agricoles et industriels et leur impact sur la rentabilité et l'attractivité de la filière canne-énergie

3.2 Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de biomasse issue de canne à fibres à Capesterre-Belle-Eau

Jean-Marc BLAZY, François CAUSERET, Pierre CHOPIN, Jean-Louis DIMAN, Loïc GUINDÉ, INRA Centre Régional Antilles-Guyane (UR ASTRO)

3.2.1 Méthode employée pour estimer le gisement agricole potentiel

Démarche générale

La zone ciblée porte sur le territoire agricole de la commune de Capesterre-Belle-Eau (CBE). Notre échelle d'analyse est la parcelle agricole. Pour évaluer le gisement potentiel en canne à fibres (CF), la démarche s'est appuyée sur un jeu de données décrivant le parcellaire actuel de la commune et sur un corpus d'hypothèses relatives aux conditions d'implantation d'une culture de canne à fibres (Figure 1). Ces hypothèses ont été formulées sur la base d'une part d'une analyse rétrospective de l'usage actuel des sols à CBE, et d'autre part en s'appuyant sur l'expertise des différents acteurs du secteur agricole dans la zone étudiée. Toutes ces hypothèses ont été regroupées en des ensembles cohérents formant des scénarios pour l'estimation du gisement potentiel. Pour simuler quantitativement le gisement agricole potentiel sous les différents scénarios, nous avons développé un outil informatique : le modèle GIZKAN. Ce modèle correspond à une représentation simplifiée du territoire de CBE à travers la base de données géographiques du parcellaire. L'implémentation dans le modèle de modules permettant de traduire mathématiquement les règles d'éligibilité permet de paramétrer les différents scénarios et de quantifier les surfaces disponibles pour le gisement. Une analyse transversale des résultats obtenus ainsi que des analyses de sensibilité avec le modèle ont été réalisées afin de déterminer quels facteurs clés peuvent être de puissants leviers ou au contraire des freins à la formation du gisement (prix d'achat, capacité des machines agricoles, rendement agronomique, etc.).

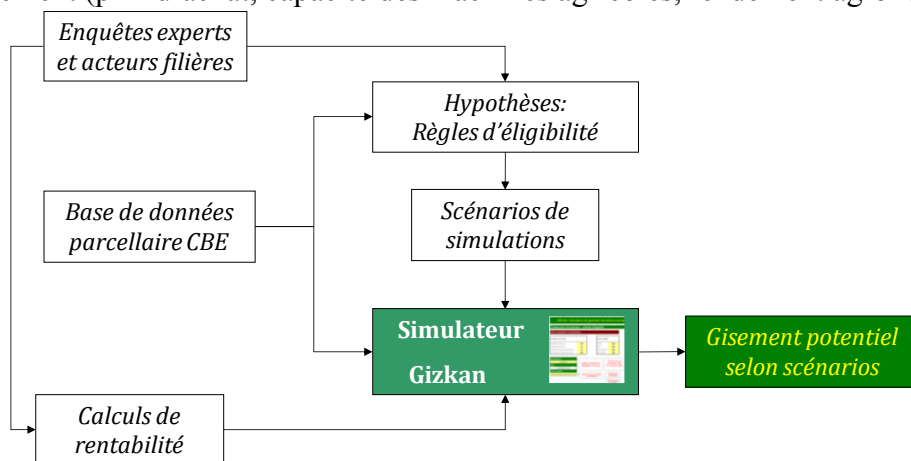


Figure 1. Démarche générale pour estimer le gisement agricole potentiel.

Hypothèses

En première approche, pour évaluer le gisement potentiel de canne à fibres (CF), la démarche s'est appuyée sur le corpus d'hypothèses présentées dans la Figure 2. Nous considérons que le gisement agricole potentiel dépend de deux grands facteurs.

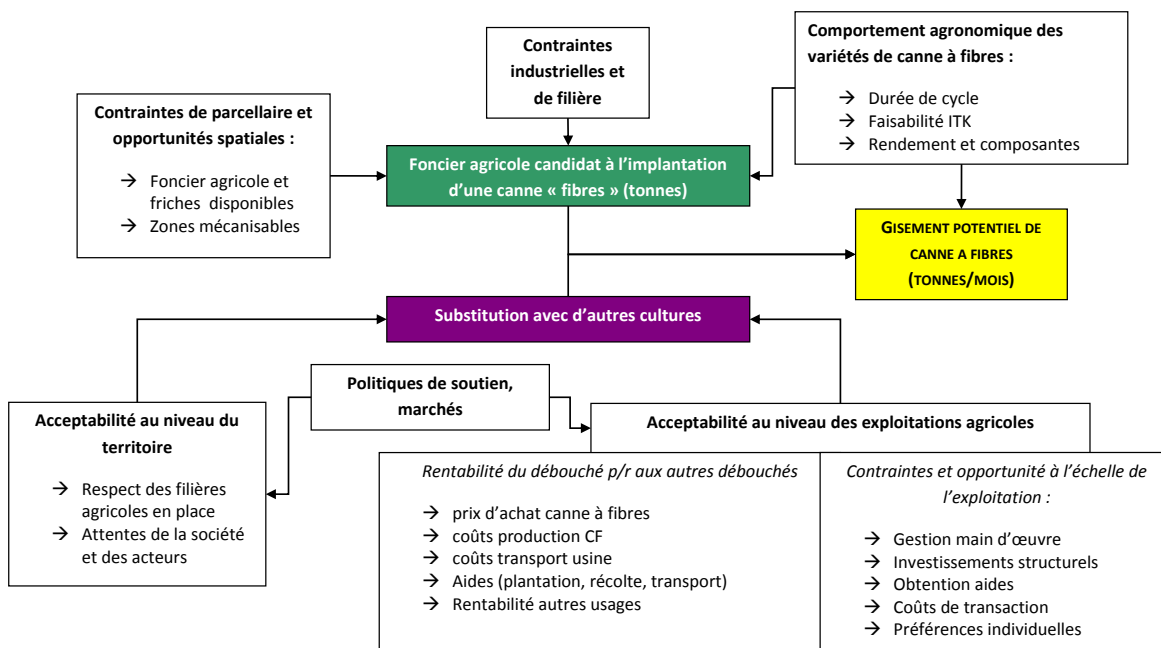


Figure 2 Diagramme des déterminants potentiels de gisement de canne à fibre

En premier lieu, pour être "éligible" au nouveau débouché, une parcelle doit avoir des caractéristiques pédoclimatiques et topographiques rendant possible son exploitation à des fins de production de canne à fibres. Cette éligibilité permet de définir le gisement foncier agricole candidat à l'implantation de canne à fibres, il constitue le gisement surfacique potentiel.

En deuxième lieu, pour être effectivement considérée comme une parcelle susceptible de participer au gisement en canne à fibres, nous considérerons que la substitution de l'usage actuel par le nouveau débouché est économiquement et socialement acceptable (rentabilité économique, respect des filières en place, instruments de soutien). Une fois le gisement potentiel établi, c'est le comportement agronomique et industriel des variétés de canne à fibres qui définira le gisement effectif et sa dynamique (cf. volet agro-variétal du programme REBECCA).

Compte tenu des moyens et délais impartis dans le cadre de la présente étude d'une part, de son positionnement dans la première étape du programme de recherche REBECCA d'autre part, certains paramètres techniques insuffisamment connus ont conduit aux choix méthodologiques suivants :

- Tous les paramètres relatifs au comportement agronomique des variétés de canne à fibres (rendement, itinéraire technique de conduite, contraintes agropédoclimatiques d'implantation et de récolte, etc.) ont été établis avec les partenaires du CIRAD en charge du volet agro-variétal. Les contraintes d'implantation et les modalités de conduite de la canne à fibres sont basées sur le modèle actuel de la canne à sucre.
- Concernant le processus de choix de mise en place d'une canne "fibre" par les agriculteurs (processus de substitution), nous considérons que ce processus est le résultat d'une logique de maximisation de marge brute, tout en prenant en compte les contraintes agropédoclimatiques. On ne considérera pas faute de temps et de données pour ce faire, les éventuelles contraintes spécifiques que les exploitations pourraient rencontrer (ex : contraintes de main d'œuvre, d'investissements structurels, coûts de transaction, préférences individuelles).

- L'acceptabilité collective est considérée de manière prospective à partir d'une analyse du système d'acteurs et des stratégies et logiques en vigueur sur le territoire. Dans le cadre de la présente étude nous avons procédé à un recensement des risques et opportunités pour les différents acteurs potentiellement concernés par la mise en place de ce nouveau débouché.
- Les politiques agricoles en cours ont été prises en compte et des pistes de leviers d'action pour le soutien de la filière émergent de la présente étude (voir la section Discussion du présent rapport). Néanmoins, l'analyse et la proposition de politiques et autres instruments de soutien au développement de la nouvelle filière devra être approfondie dans le cadre de la phase 2.

Données sur le parcellaire agricole de Capesterre-Belle-Eau

Pour modéliser le parcellaire agricole de Capesterre-Belle-Eau, nous nous sommes appuyés sur les données géographiques recueillies par l'association AGRIGUA (Association Guadeloupéenne de Recueil d'Informations Géographiques d'Utilité Agricole), dont l'INRA Antilles-Guyane est membre. Ces données ont servi à deux titres : 1) analyser les caractéristiques du parcellaire pour définir des conditions d'éligibilité des parcelles et 2) paramétrer GIZKAN, l'outil développé pour simuler le gisement sous différents scénarios.

La mise à jour du parcellaire cultural est issue du traitement de l'ensemble des déclarations de surface graphiques, obligatoire depuis 2004. Nous avons obtenu les données pour la période 2004 à 2010 (dernière année disponible à ce jour). Les données nous ont été fournies par Agrigua. Nous avons intégré la base de données 2004 à 2010 sous le logiciel SIG Arc Gis. Une partie seulement des variables a été retenue. Celles correspondant à une information incomplète ou inutile à notre étude ont été éliminées. Après nous être informés auprès d'AGRIGUA, la base de données a été préalablement filtrée en éliminant les individus statistiques (parcelles) incomplètement renseignés qui correspondent vraisemblablement aux parcelles sorties de l'agriculture. Nous avons pris la décision de ne pas les intégrer. Les informations portées par les parcelles retenues dans la base de données constituée pour cette étude sont donc fiables. L'ensemble des individus au sens statistique, c'est-à-dire les parcelles et toutes les données attributaires liées, a été contrôlé et validé.

Une base de données pluriannuelle 2004-2010 a été constituée sous le logiciel SAS. Des traitements ont été effectués avec ce logiciel pour obtenir des informations depuis l'échelle de la parcelle à celle de l'exploitation (ex : pente, altitude, successions culturales). Les variables retenues pour l'étude sont : l'identifiant de la parcelle, l'identifiant (anonyme) de l'exploitant la surface de la parcelle (ha), la longueur du périmètre de la parcelle (m), l'altitude moyenne de la parcelle (m), sa pente moyenne (%), la commune où est située la parcelle, le mode de faire-valoir, le type de sol majoritaire, la probabilité de risque de contamination par la chlordécone et les cultures déclarées entre 2004 et 2010 (28 modalités)

A la suite de ce travail de construction et validation de la base de données, nous avons une base de données constituée de 2111 parcelles de Capesterre-Belle-Eau, notre zone d'étude, pour une superficie de 2235 ha. Nous avons également retenu 137 parcelles, pour une surface de 120 ha sur les communes limitrophes de Goyave et Trois-Rivières. Elles sont exploitées par des agriculteurs ayant leur exploitation majoritairement sur Capesterre-Belle-Eau. La zone d'étude couverte par notre base de données représente donc 2248 parcelles pour 2355 ha correspondant à 211 exploitations agricoles. Nous avons comparé notre base validée au Recensement Agricole de 2010 pour la commune de Capesterre-Belle-Eau (327 exploitations agricoles pour 2 486 ha). Nous aboutissons à une représentation de 65% des exploitations et 90% des superficies.

Enquêtes auprès d'experts et des acteurs des filières agricoles en place

Nous avons effectué des entrevues avec différents acteurs du secteur agricole dans la zone étudiée, en particulier, l'organisation des producteurs de bananes de Guadeloupe (LPG), spéculation prédominante dans la zone, et les acteurs de la filière canne à sucre (CUMA côte au Vent, Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe, UDCAG, IGUACANNE) détenteurs d'une expertise sur le développement cannier en Guadeloupe et singulièrement dans la zone d'étude.

L'objectif de ces entretiens était double : d'une part identifier la position des principaux acteurs agricoles de la zone vis-à-vis du nouveau débouché canne à fibres (stratégies, positionnement, attentes, opportunités, inquiétudes, craintes), et d'autre part mobiliser l'expertise technique et économique des acteurs dans le but de paramétrer au mieux l'outil de simulation du gisement GIZKAN. Les entretiens ont eu lieu sur la période octobre-novembre 2011. Les positions des principaux acteurs ont également pu être identifiées au cours de la réunion d'information sur le projet REBECCA organisée par la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie (DRRT) pour les professionnels le 29 novembre 2011.

Analyse de la rentabilité des différentes spéculations en présence

Le niveau de rentabilité est une variable centrale pour les agriculteurs dans le choix des cultures à mettre en place sur leurs parcelles. Pour chacune des principales cultures présentes en 2010 sur les parcelles de la zone d'étude, un niveau moyen de rentabilité a été déterminé (Tableau 1). Le critère choisi est celui de la marge directe par hectare.

$\text{Marge directe/ha} = (\text{Produit des ventes/ha} + \text{Aides/ha}) - \text{Charges variables/ha}$

Les charges considérées comprennent les charges de mise en place de la culture, d'entretien et de récolte. Nous avons pris en compte le coût des intrants et de la main d'œuvre. La marge directe n'inclut pas les charges de structure de l'exploitation (charges foncières, amortissement des bâtiments et des équipements spécifiques).

Les principales sources de données utilisées sont les sorties du modèle INRA "Banamarge" pour la banane export, le Référentiel Technico Economique 2007 (RTE 2007) élaboré par les services de la Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe pour les autres spéculations. La canne à sucre a fait l'objet d'un recoupement entre différentes sources afin d'affiner et de renforcer les données utilisées (RTE, 2007 ; Bilonière, 2011 ; INRA, enquêtes projet MICA).

Les composantes de la marge de la canne à fibres sont issues de l'extrapolation des données de l'itinéraire technique de la canne à sucre (Tableau 2). Les données de prix et de rendement ci-dessous ne sont qu'indicatives, puisqu'elles dépendent des résultats des volets agronomiques et économiques du projet REBECCA.

| Spéculations agricoles | Marge directe (en €/ha) |
|------------------------|----------------------------|
| Friches | 0 |
| Bois | 0 |
| Jachère | 500 |
| Prairie permanente | 2 125 |
| Savane pâturée | 2 125 |
| Prairie temporaire | 2 125 |
| Canne à sucre | 3 487 |
| Banane créole | 3 845 |
| Banane Export | 4 032 |
| Igname | 4 231 |
| Agrumes | 5 856 |
| Autres cultures | 10 000 |
| Alpinia * | 12 829 |
| Ananas | 15 462 |
| Légumes de plein champ | 17 501 |

Tableau 3: Marges directes des principales cultures présentes sur la zone en 2010.

| | | CANNE A | CANNE À |
|---|-------------|----------------|----------------|
| Produit des ventes | €/ha | 2 589 | 6 750 |
| Prix | €/t | 26.42 | 45* |
| Rendement | t/ha | 98 | 150* |
| Aides replantation | €/ha | 255 | 0 |
| ICHN (indemnité de compensation handicap naturel) | €/ha | 150 | 150 |
| Aide à la garantie de prix | €/ha | 2 333 | 0 |
| | €/T | 23.81 | 0 |
| Aide au transport | €/ha | 732 | 0 |
| | €/T | 4.88 | 0 |
| Prime Bagasse | €/ha | 238 | 0 |
| | €/T | 10 | 0 |
| Total des produits | €/ha | 6 786 | 7 900 |
| Total des charges de plantation | €/ha | 287.6 | 287.6 |
| Total des charges d'entretien | €/ha | 3 010.7 | 3 714.6 |
| Marge directe | €/ha | 3 487 | 3 898 |

Tableau 4: Marges directes annuelles de la canne à sucre et de la canne à fibres. * : exemple de scénarios.

Création d'un outil informatique de simulation du gisement : GIZKAN

Afin d'estimer le gisement agricole potentiel sous les différents scénarios, nous avons développé le simulateur "GIZKAN" qui permet d'évaluer le gisement surfacique et massique sous différents

scénarios agro-économiques d'émergence d'une filière canne à fibres dans la zone (Figure 4). Ce modèle statique déterministe comprend la base de données géographiques sur le parcellaire et des modules permettant 1) de traduire mathématiquement un ensemble de règles d'éligibilité, 2) de paramétrer ces règles (seuils), 3) de calculer pour l'ensemble des parcelles les valeurs des indicateurs d'éligibilité et 4) de stocker des jeux de simulations. Il permet ainsi de paramétrer les scénarios et de quantifier le gisement par les surfaces cultivées et la biomasse produite.

Les règles d'éligibilité modélisées sont relatives aux caractéristiques des parcelles (usages, contraintes pédoclimatiques et topographiques, tenure foncière), des marges des spéculations en présence, du prix d'achat de la canne à fibres, de la productivité surfacique (rendement agronomique en tonnes/hectare/an) et des politiques économiques de soutien aux différentes filières. En sortie du modèle, nous obtenons le gisement surfacique et la quantité de biomasse produite ainsi qu'un tableau de bilan de l'usage des sols du parcellaire. Les différents scénarios analysés sont décrits en sortie par les variables suivantes : gisement surfacique "physique", gisement surfacique "physico-économique", gisement en masse (offre de biomasse en tonnes par an). Une analyse transversale des résultats obtenus ainsi que des analyses de sensibilité avec le modèle ont été réalisées afin de déterminer quels facteurs pèsent le plus sur la formation du gisement. Ceci nous a permis d'établir des courbes d'offre surfacique et massique.

| GIZCAN : simulateur de gisement de cultures énergétiques à l'échelle du territoire | | | | | | |
|--|------------------|---|-----|--------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Construction de scénario : critères d'éligibilité | | | | | | |
| Critères topographiques et pédoclimatiques | | | | Critères socio-économiques | | |
| Possibilité de mécanisation | | Type de sol éligible | | | Cultures éligibles | Marges cultures (€/ha/an) |
| Seuil d'altitude maximum (m) | 250 | Andosols | OUI | Banane export | OUI | 4032 |
| Seuil de pente maximum (%) | 20 | Nitisols | OUI | Canne à sucre | OUI | 3487 |
| Seuil de surface minimum de la parcelle (ha) | 0.1 | Alluvions-Colluvions | OUI | Jachère | OUI | 500 |
| Seuil de longueur de périmètre minimum (m) | 130 | Sols ferrallitiques | OUI | Prairie permanente | OUI | 2125 |
| Nom utilisateur: | Jean-Marc | <div>Copier et stocker la simulation en cours</div> <div>Stocker le jeu de simulations dans une nouvelle feuille</div> | | Banane créole | OUI | 3845 |
| Date: | 16/04/2012 17:28 | | | Friches | OUI | 0 |
| Nom du scénario: | | <div>Effacer espace de stockage des simulations</div> <div>Protection des deux feuilles</div> <div>Déprotection des deux feuilles</div> | | Bois | NON | 0 |
| e avec contraintes supérieures sur caracté | | | | Savane pâturée | OUI | 2125 |
| | | | | Ananas | OUI | 15462 |
| | | | | Prairie temporaire | OUI | 2125 |
| | | | | Agrumes | NON | 5856 |
| | | | | Autres cultures | OUI | 10000 |
| | | | | Canne fibre | OUI | 3898 |
| Résultats : offre de culture énergétique et usages du sol | | | | Stockage simulations scénarios | | |

Figure 2 : Capture d'écran de l'interface de simulation du logiciel Gizkan.

3.2.2 Résultats

Usages actuels des sols de Capesterre-Belle-Eau

Le projet REBECCA intervient dans une situation où Capesterre-Belle-Eau comporte une SAU de près de 2 400 hectares selon le dernier Recensement Général Agricole (DAF, 2011). Cette superficie est fortement en recul comparativement aux recensements précédents (Figure 5). En 30 ans, la superficie agricole de la sole a presque diminuée de moitié et le nombre d'exploitations a lui été réduit d'un facteur 4. On observe ainsi une déprise agricole et une tendance à l'augmentation de la superficie moyenne des exploitations.

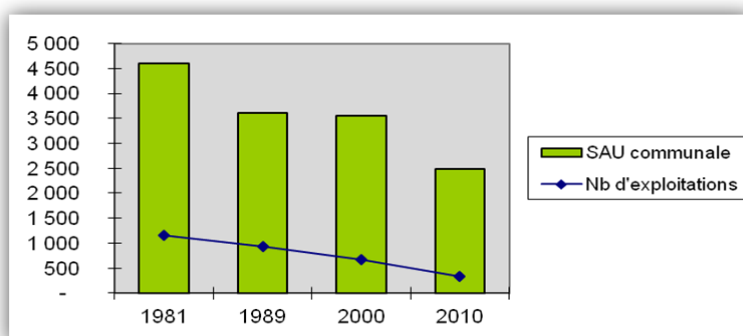


Figure 3: Evolution censitaire de la SAU et du nombre d'exploitations agricoles à Capesterre-Belle-Eau.

D'après la base de données parcellaire, le bilan cumulé de l'usage actuel du parcellaire agricole de CBE est présenté dans le Tableau 3. D'après les données de déclaration de surface, les principaux usages du sol sont la culture de la banane (1 235 ha), la canne à sucre (398 ha) et les jachères (336 ha). Environ 120 hectares sont utilisés dans le cadre de prairies, savanes ou espaces pâturés. Les autres cultures représentent chacune des surfaces cumulées de moins de 50 hectares. Ce sont principalement des cultures alimentaires à forte valeur ajoutée destinées au marché local (ananas, banane créole, agrumes). Les friches représentent 50 hectares et les bois 33 hectares. Enfin, 90 hectares correspondent à des cultures de faible importance surfacique (moins de 10 ha chacune). Une représentation cartographique du parcellaire actuel est proposée en Figure 6.

| Usages (2355 ha) | Surface de la sole (ha) | Nombre exploitations | SAU des exploitations | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | | | médiane | minimum | moyenne | maximum |
| Banane export | 1235 | 130 | 7.4 | 1.0 | 13.9 | 242.6 |
| Canne à sucre | 398 | 29 | 17.5 | 1.6 | 32.4 | 242.6 |
| Jachère | 336 | 116 | 8.0 | 1.0 | 13.4 | 81.2 |
| Prairie permanente | 63 | 22 | 4.4 | 2.1 | 5.8 | 20.7 |
| Banane créole | 51 | 44 | 4.0 | 1.0 | 7.8 | 81.2 |
| Friches | 50 | 26 | 5.5 | 1.2 | 8.3 | 37.4 |
| Bois | 33 | 9 | 8.7 | 0.9 | 16.8 | 61.1 |
| Savane pâturée | 30 | 14 | 2.7 | 0.9 | 9.4 | 38.7 |
| Ananas | 29 | 21 | 5.6 | 1.0 | 12.9 | 81.2 |
| Prairie temporaire | 27 | 7 | 8.8 | 5.6 | 13.8 | 38.7 |
| Agrumes | 11 | 14 | 4.3 | 0.7 | 12.5 | 81.2 |
| Autres cultures | 90 | 53 | 3.5 | 0.0 | 5.7 | 41.0 |

Tableau 5: Usage des sols en 2010 et caractéristiques principales des exploitations concernées

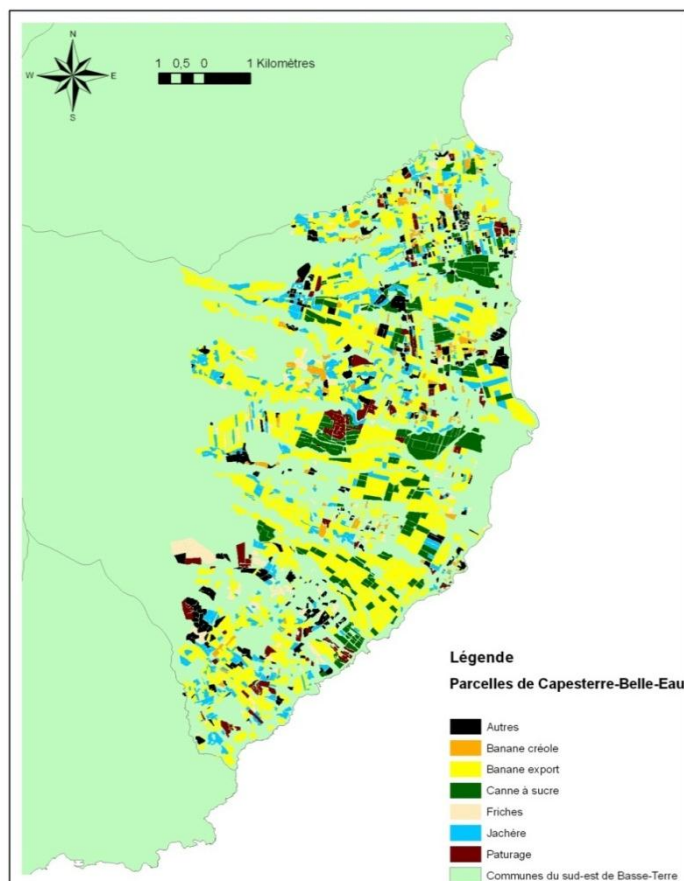


Figure 4. Représentation cartographique du parcellaire agricole de Capesterre-Belle-Eau

En ce qui concerne les caractéristiques des exploitations du territoire, plusieurs points d'importance pour l'estimation du gisement sont à noter. Tout d'abord le nombre d'exploitations qui cultivent de la canne à sucre est relativement peu important, malgré un gisement potentiel de 400 hectares. Les exploitations "cannières" de la zone sont principalement de grande taille (SAU médiane de 17.5 ha et moyenne de 32.4 ha). Près de 60% des exploitations sont orientées vers la production de banane pour l'export. Les tailles médianes et moyennes de ce dernier groupe d'exploitations sont réduites comparativement aux exploitations qui possèdent de la canne (médiane de 7.4 et moyenne de 13.9 ha).

Un autre élément important de cette analyse des caractéristiques des exploitations concerne la jachère puisque cet usage représente la troisième source potentielle de gisement. Il est à noter que la pratique de la jachère est présente dans plus de la moitié des exploitations. Cet usage du sol concerne donc comme la banane, un nombre important d'exploitants du territoire. Mis à part la banane "créole" et les surfaces en friches, le nombre d'exploitations concernées par d'autres usages du sol reste faible (moins de 30 exploitations).

Parmi les spéculations présentes, la canne à sucre (*Saccharum officinale*) est une espèce cultivée depuis déjà bien longtemps sur le territoire de la commune. L'industrie sucrière a été très active dans la zone jusque dans les années soixante. Après la fermeture de la sucrerie de Marquisat, seule une activité rhumière s'est maintenue (Distillerie Longueteau). Toutefois depuis 1998, compte tenu des difficultés rencontrées par la filière bananière, omniprésente dans la zone au cours des cinquante dernières années, un retour de la canne à sucre s'est organisé, principalement

dans des systèmes de rotation avec la bananeraie, ceci dans l'objectif d'interrompre le cycle des ravageurs affectant cette dernière (charançon noir du bananier, nématodes telluriques, etc.).

Aujourd'hui, d'après la Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe, on compterait une trentaine de planteurs de canne au Sud Basse-Terre, principalement à CBE. L'activité cannière de ceux-ci est organisée et suivie principalement par la CUMA "Côte au vent" dont les activités ont démarré en 2005, et qui après une augmentation rapide du volume de cannes traitées, a vu son activité se tasser au cours des dernières années, sous l'effet conjugué d'un plafonnement du nombre de planteurs bananiers s'engageant dans des rotations avec la canne à sucre, et d'un renforcement de la présence d'un opérateur de récolte privé dans la zone. Elle demeure toutefois le second plus gros opérateur de récolte de toute la Basse-Terre puisque traitant en 2007 près de 15% de l'ensemble du tas de cannes des planteurs affiliés à l'UDCAG (Union pour le Développement Cannier de la Guadeloupe).

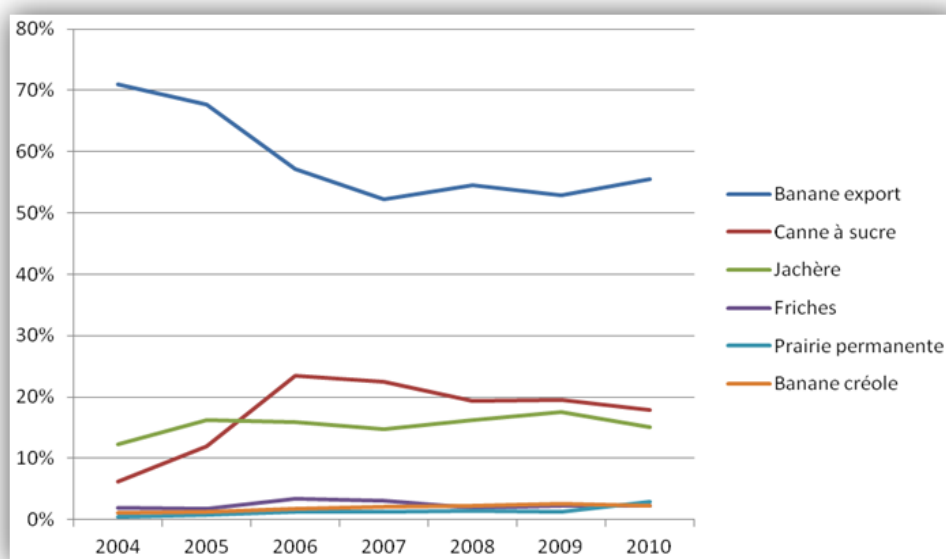


Figure 5: Evolution de la part dans la surface totale du parcellaire des principales cultures de Capesterre-Belle-Eau.

La proportion de banane export sur le territoire est en diminution (**Figure 7**). Cette diminution peut s'expliquer par l'augmentation de la culture de la canne à sucre et le développement de la pratique de la jachère en bananeraie entre 2004 et 2010, et dans une moindre mesure, par l'important développement de la banane créole et de l'ananas (triplement des surfaces même si celles-ci restent inférieures à 50 hectares). Comme mentionné ci-dessus, nous pouvons penser légitimement que la culture de la canne à sucre et la jachère ont remplacé une part de la surface en banane export sur le territoire, dans le cadre de mises en place de rotations banane-canne et banane-jachère, ou de changements d'orientation productives ou d'une diversification des exploitations bananières.

Analyse des caractéristiques topographiques des parcelles

A l'examen des données du Tableau 4, il apparaît nettement que les spéculations ne sont pas spatialement réparties de façon aléatoire sur le territoire de CBE. Relativement aux autres spéculations, la canne à sucre s'est développée dans les zones les plus basses (l'altitude maximum de localisation est de 250 m), sur des parcelles de grande taille (surface médiane de 1.5 ha et de 574 m de périmètre) et comportant une faible pente (médiane de 7%). Cette localisation particulière peut s'expliquer par les méthodes de récolte privilégiées lors de la réimplantation de la canne à sucre sur le territoire communal.

| Usages (2 355 ha) | N= parcelles | Surface (ha) | Altitude (m) | Pente (%) | Périmètre (m) |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|---------------|
| Banane export | 1194 | 0.81 | 133 | 11 | 431 |
| Canne à sucre | 215 | 1.49 | 77 | 7 | 574 |
| Jachère | 418 | 0.58 | 149 | 14 | 381 |
| Prairie permanente | 52 | 0.72 | 146 | 12 | 394 |
| Banane créole | 83 | 0.42 | 114 | 12 | 316 |
| Friches | 41 | 0.81 | 192 | 20 | 425 |
| Bois | 11 | 2.26 | 177 | 19 | 723 |
| Savane pâturée | 21 | 0.86 | 101 | 8 | 442 |
| Ananas | 37 | 0.56 | 99 | 11 | 323 |
| Prairie temporaire | 26 | 0.97 | 170 | 19 | 457 |
| Agrumes | 18 | 0.55 | 227 | 15 | 348 |
| Autres cultures | 132 | 0.43 | 143 | 11 | 287 |

Tableau 6: Caractéristiques topographiques médianes des parcelles en fonction du type d'usage

En effet, toute la sole cannière y est aujourd'hui récoltée mécaniquement, ce qui suppose que les conditions opératoires pour le passage des engins lourds que sont les récolteuses de cannes soient réunies. Cette caractéristique peut expliquer également qu'en dehors des parcelles boisées, les parcelles de canne à sucre sont celles qui ont la valeur de superficie médiane la plus importante. L'organisation mécanique de la récolte est celle qui permet de réduire les coûts ou manques à gagner inhérents à cette opération, en réduisant i) le personnel requis par hectare récolté, ii) le temps nécessaire à la récolte, iii) le risque de perte de richesse saccharine post-récolte. Un focus sur les caractéristiques topographiques des parcelles en canne à sucre révèle plusieurs points importants pour la formation du gisement (Tableau 5). Tout d'abord il n'y a pas de parcelles au-delà des seuils de 20% de pente et 250 mètres d'altitude. Ensuite, on constate que les valeurs de premier quartile pour les variables surface et périmètre sont élevées, respectivement de 0.8 ha et 431 m, ce qui vient confirmer que les parcelles de canne pouvant accueillir un chantier de récolte mécanisée comportent peu de contraintes physiques. Ce point est d'autant plus important que dans le cadre de la mise en place d'une filière agro-industrielle de biomasse canne, l'approvisionnement de l'usine devra être constant au cours de l'année alors que la récolte de la canne intervient aujourd'hui seulement en saison sèche. Dans une étape ultérieure du projet REBECCA, il conviendra donc de bien préciser les périodes d'accessibilité des parcelles tout au long de l'année pour préciser les conditions logistiques de mise en place de la filière.

A priori, dans un schéma canne à fibres, ces contraintes pour l'organisation des chantiers de récolte seront également à prendre en compte (hormis la perte de richesse saccharine), et donc les superficies actuellement occupées par la canne à sucre sont potentiellement celles les plus à même de recevoir la canne à fibres sous réserve qu'économiquement cette dernière présente un avantage comparatif qui fasse pencher le choix des exploitants agricoles en sa faveur.

L'ananas est la seconde spéculation la plus basse en altitude médiane (Tableau 4) qui semble également être préférentiellement présente sur des parcelles de pente relativement faible

(médiane de 11%). La substitution de ces superficies en ananas pourrait sembler envisageable d'un point de vue du milieu physique, même si du point de vue économique l'ananas est une spéculation beaucoup plus rémunératrice que la canne. Par ailleurs, d'un point de vue opératoire, ces parcelles ont une taille médiane près de trois fois inférieure à celle des parcelles emblavées en canne à sucre, il est donc probable que ces parcelles se révèlent difficilement opérantes pour des chantiers de récolte de canne. Les parcelles en bois sont de taille importante, mais de même que les parcelles en friches ou celles sous prairies temporaires, elles semblent difficilement mobilisables pour une activité de production de canne avec récolte mécanisée compte tenu de leur topographie, car elles se situent majoritairement à des altitudes plus importantes et dans des zones comportant des pentes plus raides.

| n = 215 parcelles | Altitude (m) | Pente (%) | Surface (ha) | Périmètre (m) |
|-------------------------|--------------|-----------|--------------|---------------|
| Minimum | 13 | 2 | 0.1 | 146 |
| 1er quartile | 49 | 5 | 0.8 | 431 |
| Médiane | 77 | 7 | 1.5 | 574 |
| 3ème quartile | 140 | 9 | 2.3 | 715 |
| Maximum | 244 | 21 | 16.8 | 1 853 |
| Moyenne | 96 | 8 | 1.9 | 594 |
| CV (écart-type/moyenne) | 65% | 43% | 93% | 42% |

Tableau 7: Caractéristiques topographiques des parcelles actuellement cultivées en canne à sucre

Analyse des successions culturales

Comme mentionné ci-avant, la base de données Agrigua utilisée pour l'étude des successions culturales, présente pour certaines parcelles des données manquantes dues à l'absence de déclaration de certaines parcelles pour une année donnée. Il nous a tout de même été possible de caractériser certains types de motifs de succession culturelle (Tableau 6) sur notre base de données qui représente 2 248 parcelles pour une surface totale de 2 345 hectares.

Le tableau 6 montre que les systèmes à base de bananes export, canne à sucre et bananes créoles sont majoritaires sur la commune de Capesterre-Belle-Eau. Ils occupent près de 75% du parcellaire de la commune. L'analyse des successions culturales montre que le système "banane export en monoculture" disparaît au profit de systèmes en rotation avec de la jachère ou de la canne à sucre. La jachère est généralement implantée pendant une année pour assainir les parcelles des nématodes phytoparasites du bananier (*Radopholus similis* principalement). La canne à sucre quant à elle est généralement cultivée durant 4 années consécutives lors de rotations avec la banane export. 192 hectares sont cependant mobilisés pour des systèmes en monoculture de canne à sucre. Une moindre proportion de ces parcelles inclut une période de jachère (19 hectares). La culture des "bananes créoles" est positionnée dans des systèmes en rotation avec des jachères ou de la banane export. Près de 60 hectares du parcellaire de CBE sont en jachère permanente. Cela amène à s'interroger sur l'origine de ces situations : correspondent-elles à une déprise agricole proche (perspective de vente à des fins d'urbanisation) ou bien à une stratégie de régénération de la fertilité des parcelles ou de régénération de la trésorerie des exploitations ? Enfin, un ensemble de parcelles pour une superficie de 450 hectares est constitué de systèmes diversifiés (en moyenne 4 cultures différentes sur 7 ans) ou des systèmes sans rotation (autres que banane export, banane créoles, canne à sucre, friches et jachères).

| <i>Culture principale de la succession culturale</i> | <i>Description des systèmes</i> | <i>Nombre de parcelles</i> | <i>Surface (ha)</i> |
|--|--|----------------------------|---------------------|
| <i>Banane export</i> | <i>Banane export avec au moins 1 jachère dans la succession</i> | 671 | 655 |
| | <i>Monoculture de banane export</i> | 579 | 511 |
| <i>Banane export & canne à sucre</i> | <i>Système canne à sucre et banane export avec présence ou non de jachère</i> | 218 | 392 |
| <i>Canne à sucre</i> | <i>Système canne à sucre en monoculture</i> | 97 | 192 |
| | <i>Canne à sucre avec au moins 1 jachère dans la succession</i> | 10 | 19 |
| <i>Banane créole</i> | <i>Banane créole avec ou sans jachère</i> | 52 | 37 |
| <i>Banane créole & banane export</i> | <i>Système mixte banane créole et export (avec ou sans jachères)</i> | 50 | 29 |
| <i>Jachère</i> | <i>Jachère permanente pendant la période</i> | 85 | 60 |
| <i>Autres</i> | <i>Systèmes diversifiés (en moyenne 4 cultures différentes sur 7 ans)</i> | 379 | 347 |
| | <i>Systèmes sans rotation (autres que banane export, banane créoles, canne à sucre, friches et jachères)</i> | 107 | 103 |
| TOTAL | | 2 248 | 2 345 |

Tableau 8: Principales successions culturales sur le parcellaire agricole de Capesterre-Belle-Eau entre 2004 et 2010.

En conclusion de cette partie sur l'analyse du parcellaire agricole actuel, nous retiendrons que :

- 1) Les principaux usages du sol sont la banane (1 235 ha), la canne (398 ha) et la jachère (366 ha). Ces spéculations sont le plus souvent en rotation, même s'il existe des monocultures.
- 2) Une part non négligeable est occupée par des parcelles s'apparentant à des espaces pâturés (environ 120 ha), ou des friches et bois (80 ha).
- 3) Le reste du parcellaire est constitué de cultures qui prises individuellement sont d'une moindre importance surfacique, mais qui au total, représentent une importante surface dédiée à la diversification culturale orientée vers le marché local (environ 200 ha).

La localisation dans l'espace de la canne à sucre est fortement liée à des contraintes topographiques pour les chantiers d'implantation et de récolte mécanisée.

Perception de l'opportunité et faisabilité selon les acteurs

La filière bananière quoiqu'en perte de vitesse reste le secteur de production agricole prépondérant sur le territoire de la commune de Capesterre-Belle-Eau (CBE). La production de banane Cavendish destinée à l'exportation occupe selon le groupement LPG près de 1 300 hectares sur le territoire de CBE. Cela constitue plus de la moitié de la SAU communale et près de 65% de la bananeraie guadeloupéenne. Centrale pour l'agriculture de CBE, cette sole bananière revêt également une grande importance pour la survie de l'ensemble de la filière correspondante. Concernant l'éventualité de la mise en place d'une filière canne à fibres sur le territoire de CBE, nos interlocuteurs de la filière bananière se sont montrés très à l'écoute. Toutefois, l'argument de la contamination des sols n'est pas considéré comme recevable par la profession bananière. Le bananier est selon eux la meilleure stratégie productive face aux restrictions imposées par les décrets préfectoraux quant à la mise en place et surtout à la commercialisation de produits agricoles alimentaires développés au contact de sols contaminés. Maintenant, la possibilité d'avoir une canne à "fibres" comme plante assainissante alternative à la canne à sucre dans les rotations avec la banane Cavendish apparaît plutôt comme une perspective intéressante, surtout si cela permet d'écourter la durée de la présence de la canne dans la rotation. Ceci étant, la récolte de canne à fibres pour la production énergétique par combustion ne privilégiant pas que les tiges, il est possible que cela engendre des évolutions quant aux restitutions faites aux sols et donc à la fertilité intrinsèque de ceux-ci, préjudiciables à la culture de rotation.

Les opinions au sein de la filière canne à sucre sont divergentes en fonction des acteurs auxquels on s'adresse. La représentation des planteurs (UDCAG) reproche de ne pas avoir été associée assez tôt au projet REBECCA, mais considère qu'il s'agit là d'une alternative (nouveau marché) qui doit permettre aux agriculteurs d'être moins dépendants des fluctuations de l'industrie sucrière. Les planteurs sont favorables à toute étude exploratoire qui permet d'évaluer la faisabilité technique et économique de tout débouché alternatif pour leur production de canne. Certains parmi les planteurs et opérateurs de récolte, s'opposent même à ce que cette alternative ne soit développée que dans les communes du Sud Basse-Terre considérant qu'il s'agit là d'une option qui doit être offerte à tout producteur de cannes qui souhaite tirer le meilleur parti de sa production.

D'autres pensent que la production d'énergie n'est pas le futur pour la canne, ce serait plutôt la production rhumière qui serait bénéfique compte tenu qu'elle aurait d'excellentes perspectives en terme de marché potentiel à l'export avec forte valeur ajoutée. Ce débouché est bridé pour le moment par un système de quotas qui régit la production d'alcools forts sur le territoire national. Selon un des principaux dirigeants de la CUMA "Côte au Vent", premier opérateur de récolte œuvrant au Sud Basse-Terre, quel que soit le débouché réservé à la canne au Sud Basse-Terre, il faudrait pour inciter les agriculteurs à s'engager plus fortement dans cette spéculation, un prix de vente qui avoisine les 100 euros par tonne (contre environ 60 euros par tonne aujourd'hui, aides POSEI comprises).

En ce qui concerne les représentants de Gardel S.A. (usine sucrière), la position vis-à-vis du projet est une opposition forte liée à la question du devenir de l'outil industriel de Marie Galante pour lequel ils ont proposé une cogénération "bagasse-charbon", similaire à ce qui existe depuis maintenant plusieurs années à Gardel, projet en balance avec une proposition de Cann'Elec Développement, partenaire industriel du programme REBECCA. Enfin, unanimement les acteurs locaux ont fait part d'une insuffisance de communication autour du projet REBECCA.

Scénarios de simulation du gisement

Suite à cette phase d'expertise, d'analyse et de collecte de données sur le parcellaire actuel et les conditions de développement d'un gisement de canne à fibres, nous avons retenu trois familles de critères d'éligibilité des parcelles agricoles pour la mise en place d'une culture de canne à fibres :

1. Contraintes topographiques et pédoclimatiques pour l'implantation de canne à fibres : pente, type de sol, altitude de la parcelle.
2. Contraintes foncières : surface, périmètre et tenure actuelle de la parcelle.
3. Déterminants économiques : supériorité de la marge nette à l'hectare du débouché "canne à fibres" par rapport au débouché actuel, usage actuel du sol (respect des productions destinées au marché alimentaire local), faisabilité technique de la conversion (ex : exclusion des zones boisées et des parcelles d'agrumes).

Les scénarios retenus pour les simulations sont présentés dans le Tableau 7. Ces scénarios ont été obtenus en regroupant et paramétrant les règles d'éligibilité de sorte à former des ensembles cohérents. Les scénarios dépendent des contraintes de mécanisation fixées, de la possibilité d'utiliser les cannes destinées au rhum, et de l'existence éventuelle d'une prime pour la canne à fibres. Une liste complète de toutes les règles avec des exemples de paramétrage pour les différents scénarios est consultable en annexe (Blazy et al. 2012)

Nous avons retenu trois niveaux de contraintes pour la mécanisation (Tableau 8): "Contraintes des prestataires", "Contraintes actuelles canne à sucre" et "Progrès de mécanisation". Le premier jeu de contraintes correspond à une situation où les prestataires de service pour la récolte imposeraient des conditions de travail excluant les parcelles les plus difficilement mécanisables, c'est-à-dire les parcelles de faible surface. Nous avons en effet vu dans l'analyse des caractéristiques des parcelles actuelles de canne que plus de 75% des parcelles ont des surfaces supérieures à 0.8 ha, alors que de nombreuses parcelles du territoire qui pourraient être candidates au nouveau débouché ont des surfaces inférieures à ce seuil (par exemple les parcelles en jachère ont une surface médiane de 0.5 ha (Tableau 4). Le deuxième jeu de contraintes correspond à la gamme actuelle d'implantation des parcelles de canne à sucre (scénarios S5 à S8). Le troisième jeu de contraintes (S9 à S12) correspond lui à des scénarios dans lesquels des progrès de mécanisation seraient réalisés, ce qui permettrait d'exploiter des parcelles avec des pentes plus fortes (jusqu'à 25%) ou situées plus haut en altitude (jusqu'à 700 m).

Comme nous l'avons vu, certains paramètres sont clés pour la rentabilité du nouveau débouché "canne à fibres" : le prix d'achat de la canne (€/tonne), le rendement agronomique (tonnes/ha/an) et les subventions éventuelles (€/ha/an). Nous avons considéré ces trois facteurs et avons ainsi créé une autre famille de scénarios comportant une prime à la canne à fibres d'une valeur de 1000€/ha/an (il s'agit des scénarios pairs de S2 à S12). Ce montant virtuel a été raisonné sur la base des aides en vigueur dans la filière canne à sucre. En effet, actuellement, une aide de 10 euros par tonne de canne est versée aux planteurs de canne à sucre au titre de la "prime bagasse-énergie". Cette prime a pour objectif la rémunération du co-produit bagasse. En se basant sur un rendement actuel moyen sur la zone d'étude d'environ 100 tonnes/hectare, la prime bagasse-énergie s'élève à 1000€/ha/an. Il semble donc cohérent d'imaginer un maintien du montant de cette prime dans le cas d'une utilisation énergétique de la canne à fibres.

| Scénarios | Contraintes de mécanisation | Utilisation des surfaces de canne rhum | Prime canne à fibres de 1000€/ha |
|-----------|---------------------------------------|--|----------------------------------|
| S1 | "Contraintes des prestataires" | Non | Non |
| S2 | | Oui | Oui |
| S3 | | | Non |
| S4 | | | Oui |
| S5 | "Contraintes actuelles canne à sucre" | Non | non |
| S6 | | oui | oui |
| S7 | | | Non |
| S8 | | | Oui |
| S9 | "Progrès de mécanisation" | Non | Non |
| S10 | | Oui | Oui |
| S11 | | | Non |
| S12 | | | Oui |

Tableau 9: Scénarios de simulation du gisement de canne à fibres. S5 et S6 constituent les scénarios de référence.

| <i>Contraintes de mécanisation</i> | <i>Contraintes des prestataires</i> | <i>Contraintes actuelles canne à sucre</i> | <i>Progrès de mécanisation</i> |
|--|-------------------------------------|--|--------------------------------|
| Altitude maximum (m) | 250 | 250 | 700 |
| Pente maximum (%) | 20 | 20 | 25 |
| Surface minimum parcelle Canne à fibres (ha) | 0.8 | 0.1 | 0.1 |
| <i>Surf rhum mobilisable ?</i> | <i>Oui</i> | <i>Non</i> | |
| Surface canne rhum exclue du gisement (ha) | 0 | 130 | |
| <i>Prime canne à fibres ?</i> | <i>Non</i> | <i>Oui</i> | |
| Montant prime (€/ha/an) | 0 | 1000 | |

Tableau 10: Modalités des paramètres des scénarios de simulation du gisement de canne à fibres.

Enfin, nous avons créé une famille de scénarios qui correspond à l'exclusion des surfaces destinées aux distilleries (scénarios S1, S2, S5, S6, S9 et S10). Selon les experts locaux, il y a en effet à Capesterre-Belle-Eau près de 130 hectares de canne à sucre qui seraient destinés à la production de rhum. Ces 130 ha font partie des 398 ha de canne à sucre du parcellaire et il peut sembler peu réaliste de considérer que ces surfaces puissent faire partie du gisement potentiel, ce débouché présentant une valeur ajoutée très élevée.

Les douze scénarios (S1 à S12) ont été simulés pour deux valeurs de prix d'achat de la canne à fibres (45 et 65€/tonne) et deux niveaux de rendement (100 et 150 tonnes/ha/an). Comme nous le verrons dans la section suivante, ces paramètres sont déterminants pour la formation du gisement tant d'un point de vue surfacique que massique. Au bilan nous avons donc simulé le gisement surfacique et massique pour 48 scénarios. Parmi ces 48 scénarios, nous avons défini deux scénarios qui pourraient servir "de référence". Ces scénarios sont ceux qui nous semblent les plus réalistes, dans l'état actuel des connaissances à la date de rédaction du présent rapport. Il s'agit des scénarios **S5** et **S6** avec un rendement de 150 tonnes/ha/an (cf. résultat volet agro-variétal du programme REBECCA) et un prix d'achat de la canne à fibres de 45 €/tonnes (cf. volet économique du programme REBECCA sur la rentabilité industrielle). Ces deux scénarios impliquent l'exclusion des surfaces de canne destinées au rhum, et se basent sur les pratiques actuellement en vigueur pour la canne à sucre en matière de contraintes topographiques et pédoclimatiques pour la mécanisation. A la différence du scénario 5, le scénario 6 inclue en plus un soutien à la canne à fibres à hauteur de 1000 €/ha/an.

Gisements estimés selon les différents scénarios

Les Tableaux 9 et 10 présentent les gisements surfaciques et massiques simulés pour les 12 scénarios retenus selon deux niveaux de rendement agronomique (100 et 150 tonnes/ha/an) et pour un prix d'achat de la canne à fibres de respectivement 45€/tonne et 65€/tonne.

| Scénarios | Prix d'achat de la canne à fibres à 45€/T | | | |
|------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| | Rendement canne à fibres 100t | | Rendement canne à fibres 150t | |
| | surface canne à fibres (en ha) | volume canne à fibres (en t) | surface canne à fibres (en ha) | volume canne à fibres (en t) |
| S1 | 131 | 13 051 | 171 | 25 719 |
| S2 | 171 | 17 146 | 450 | 67 514 |
| S3 | 131 | 13 051 | 171 | 25 719 |
| S4 | 171 | 17 146 | 551 | 82 592 |
| S5 | 187 | 18 741 | 238 | 35 688 |
| S6 | 238 | 23 792 | 532 | 79 811 |
| S7 | 187 | 18 741 | 238 | 35 688 |
| S8 | 238 | 23 792 | 658 | 98 675 |
| S9 | 309 | 30 869 | 407 | 61 032 |
| S10 | 407 | 40 688 | 712 | 106 725 |
| S11 | 309 | 30 869 | 407 | 61 032 |
| S12 | 407 | 40 688 | 838 | 125 751 |

Tableau 11. Gisements surfaciques et massiques simulés pour les 12 scénarios retenus selon deux niveaux de rendements agronomiques (100 et 150 tonnes/ha/an) et pour un prix d'achat de la canne à fibres de 45€/tonne.

Prix d'achat de la canne à fibres de 45€/tonne

A 45€/tonne (Tableau 9), et en considérant les scénarios où les surfaces destinées au rhum sont exclues, on constate que le gisement diffère selon le niveau de rendement. A 100 t/ha/an, le gisement est au mieux de 407 hectares, à condition que les contraintes de mécanisation soient levées et qu'il existe un soutien économique à la canne à fibres. Ce soutien est indispensable pour que la rentabilité du nouveau débouché soit équivalente à celle de la canne à sucre actuelle. Si des progrès substantiels de rendement sont réalisés (rendement agronomique de 150 t/ha/an), alors le

gisement peut être plus important, jusqu'à 712 ha pour le scénario avec progrès de mécanisation. En considérant les contraintes de mécanisation actuelles, le gisement surfacique est de 238 ha (scénario S5). Si l'on ajoute un soutien économique de 1 000€/ha/an pour la canne à fibres (scénario S6), alors le gisement atteint 532 ha et un volume de canne de l'ordre de 80 000 tonnes de biomasse par an. Si l'on lève les contraintes de mécanisation du scénario S5, le gisement devient alors de 407 hectares pour un volume de biomasse proche de 60 000 tonnes/an. Pour un prix d'achat de 45 €/tonne, on constate que le rendement et l'existence du soutien économique sont déterminants pour la formation du gisement.

| Cultures et surface | Surfaces 2010 | Scénario 6 / R=150 ; P=45 | Scénario 6 / R=150 ; P=45 |
|---|---------------|---------------------------|---|
| | | (Variation absolue en ha) | Protection cultures alimentaires (Variation absolue en ha) |
| Canne à fibres (ha) | 0 | 532 | 506 |
| Banane export | 1235 | = | = |
| Canne à sucre | 268 | -268 | -268 |
| Canne à rhum | 130 | = | = |
| Jachère | 336 | -180 | -180 |
| Prairie permanente | 63 | -22 | -22 |
| Banane créole | 51 | -26 | = |
| Friches | 50 | -7 | -7 |
| Bois | 33 | = | = |
| Savane pâturée | 30 | -14 | -14 |
| Ananas | 29 | = | = |
| Prairie temporaire | 27 | -15 | -15 |
| Agrumes | 11 | = | = |
| Autres cultures | 90 | = | = |
| Gisement de canne à fibres (tonnes/an) | 0 | 79800 | 75 900 |

Tableau 12. Evolution du parcellaire de Capesterre-Belle-Eau selon les simulations du scénario 6 avec prime à la canne à fibres conditionnée ou non au maintien des cultures alimentaires.

Le Tableau 11 présente comment se forme le gisement surfacique pour le scénario 6 avec un rendement de 150 tonnes/hectare. Un peu plus de la moitié du gisement en canne à fibres est constitué de la totalité des surfaces en canne à sucre (268 ha). Le deuxième type de parcelles contribuant le plus au gisement est formé par les parcelles en jachère (180 ha). Il est intéressant de constater que sur les 336 hectares de jachère disponibles, seuls 180 sont accessibles pour des raisons de compatibilité avec les contraintes pédoclimatiques et topographiques. Pour les mêmes raisons, seuls 7 ha de friches sont accessibles sur les 50 ha présents sur la commune de Capesterre-Belle-Eau. Un peu plus de 50 hectares proviendraient de surfaces en herbe (savanes pâturées, prairies temporaires et permanentes). Enfin, l'analyse de l'évolution du parcellaire sous l'effet de l'introduction du nouveau débouché canne à fibres montre que 26 hectares de « banane créole » pourraient basculer vers la canne à fibres. Si l'on souhaite « protéger » la sole des cultures alimentaires commercialisées sur le marché local d'un changement d'usage (énergétique en l'occurrence), il faut conditionner la prime à la conversion de 1000€/ha/an au fait que l'usage actuel du sol ne soit pas de ce type. La colonne de droite du Tableau 11 montre en effet que cette mesure permettrait de maintenir entièrement la banane créole.

| Scénarios | Prix d'achat de la canne à fibres à 65€/T | | | |
|------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| | Rendement canne à fibres 100t | | Rendement canne à fibres 150t | |
| | surface canne à fibres (en ha) | volume canne à fibres (en t) | surface canne à fibres (en ha) | volume canne à fibres (en t) |
| <i>S1</i> | 440 | 43 970 | 1 135 | 170 218 |
| <i>S2</i> | 1 135 | 113 479 | 1 135 | 170 218 |
| <i>S3</i> | 540 | 54 022 | 1 235 | 185 296 |
| <i>S4</i> | 1 235 | 123 531 | 1 235 | 185 296 |
| <i>S5</i> | 506 | 50 616 | 1 366 | 204 909 |
| <i>S6</i> | 1 366 | 136 606 | 1 366 | 204 909 |
| <i>S7</i> | 632 | 63 192 | 1 492 | 223 773 |
| <i>S8</i> | 1 492 | 149 182 | 1 492 | 223 773 |
| <i>S9</i> | 675 | 67 512 | 1 809 | 271 404 |
| <i>S10</i> | 1 809 | 180 936 | 1 809 | 271 404 |
| <i>S11</i> | 802 | 80 196 | 1 936 | 290 430 |
| <i>S12</i> | 1 936 | 193 620 | 1 936 | 290 430 |

Tableau 13. Gisements surfaciques et massiques simulés pour les 12 scénarios retenus selon deux niveaux de rendements agronomiques (100 et 150 tonnes/ha/an) et pour un prix d'achat de la canne à fibres de 65€/tonne.

Enfin il est important de noter que dans le scénario 6, la totalité des surfaces en banane export, en ananas et en autres cultures (maraîchage, fleurs, cultures patrimoniales, etc.) ne sont pas affectées par l'introduction de la filière agro-industrielle de production d'électricité à partir de canne à fibres.

Prix d'achat de la canne à fibres de 65€/tonne

A un prix d'achat de 65 €/tonne, deux facteurs semblent déterminants : le rendement agronomique et la prime de soutien de 1000€/ha. En effet, en combinant un prix d'achat de 65€/tonne, des rendements élevés (150 t/ha/an) et la prime à la conversion, on aboutit à une rentabilité très élevée pour la spéculation canne à fibres. On assiste alors pour les scénarios S5 et S6 à un basculement de plus de 800 ha de banane pour aboutir à un gisement total de 1366 ha. De tels scénarios déstabiliseraient donc de manière importante la filière bananière.

Avec des rendements de la canne à fibres proches de ceux de la canne à sucre (100 t/ha/an), le gisement se situe entre 400 et 700 hectares (en excluant les cannes destinées aux distilleries), selon le niveau de contraintes ou de progrès sur les possibilités de mécanisation. Le scénario S5 aboutit à un gisement de 506 hectares. Si l'on ajoute la prime à ce scénario, le risque de déstabiliser la filière bananière réapparaît car la rentabilité de la spéculation canne à fibres dépasse celle de la banane.

Au bilan, l'analyse transversale des scénarios montre bien le poids déterminant de quatre paramètres dans la formation du gisement : le rendement agronomique, le prix d'achat de la canne à fibres, l'existence d'un soutien à la conversion vers la canne à fibres et les possibilités de mécanisation. En fonction des valeurs prises par ces paramètres le gisement peut varier d'un facteur 1 à 10

Courbes d'offre pour les différents niveaux de rendement

Les Figures 8, 9, 10 et 11 représentent les courbes d'offre inverse du gisement en surface et en biomasse en fonction du prix de rémunération de la canne à fibres, pour différentes hypothèses de rendement agronomique, de 100 à 200 tonnes/ha/an. A titre d'illustration nous avons fait figurer sur la figure deux seuils de gisement : 50 000 tonnes par an et 100 000 tonnes par an.

Chaque marche de l'escalier que forme la courbe d'offre correspond en ordonnée au prix pour lequel la culture de la canne fibre va se substituer à une culture actuellement implantée (meilleure rentabilité relative). Ce prix est donc le prix d'équilibre pour lequel la marge de la canne fibre devient supérieure à celle de la culture en place.

A titre d'illustration, pour la courbe de rendement 150 tonnes, 28€/t est le prix de substitution de la jachère par la canne fibre, à 40€/t de canne fibre, elle se substitue aux prairies, à 48€/t à la canne à sucre, et à 52€/t à la banane export. En abscisse, et selon l'unité utilisée, la longueur de chacune des marches représente le nombre d'hectares ou son équivalent en tonnes de canne fibre. On constate sur la figure 9 qu'une augmentation du rendement entraîne donc mécaniquement un accroissement de la quantité de canne fibre disponible pour un prix d'équilibre donné. Pour une quantité de canne fibre fixée, 50 000 tonnes par exemple, on voit que le prix d'équilibre peut varier de 42 à 65 euros/tonne. Pour 100 000 tonnes, le prix peut varier de 42 à 70 €/ha.

Il est important de s'arrêter sur les substitutions entre cultures, afin d'anticiper les conséquences possibles du développement de la canne fibre sur les autres filières. Les friches et les surfaces pâturables sont mobilisées même à des prix bas. Pour un rendement de 100t/ha, il faut mobiliser toutes les surfaces actuelles en canne à sucre pour produire 50000 t de canne fibre et la moitié des surfaces actuelles en banane export pour en produire 100000 tonnes. Pour un rendement de 150 t/ha, les effets sont plus mesurés.

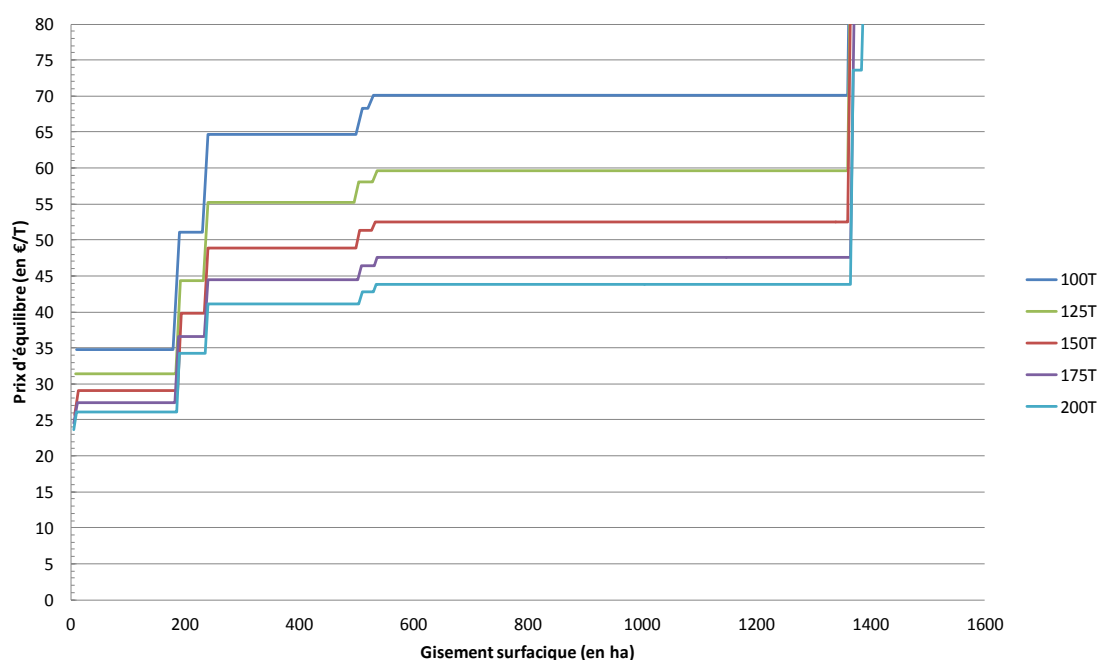


Figure 6. Courbes d'offre inverse de la canne à fibres pour différents niveaux de rendement de la canne à fibres (Scénario S5 – gisement surfacique).

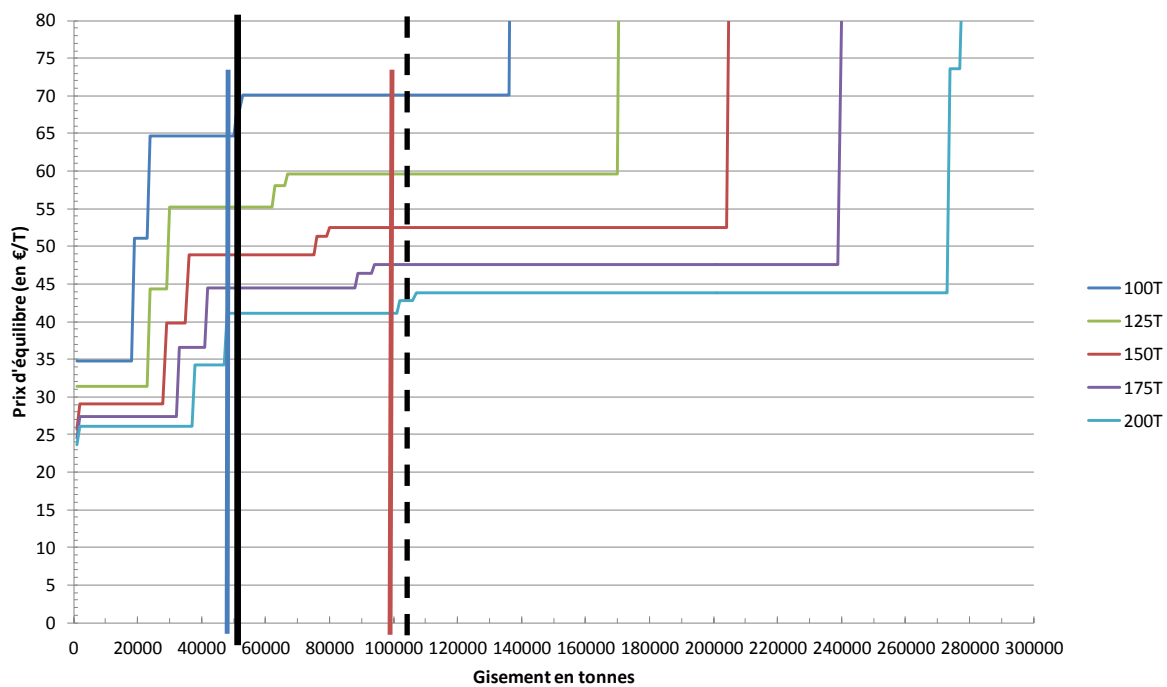


Figure 7. Courbes d'offre inverse de la canne à fibres pour différents niveaux de rendement de la canne à fibres (Scénario S5 – gisement en biomasse).

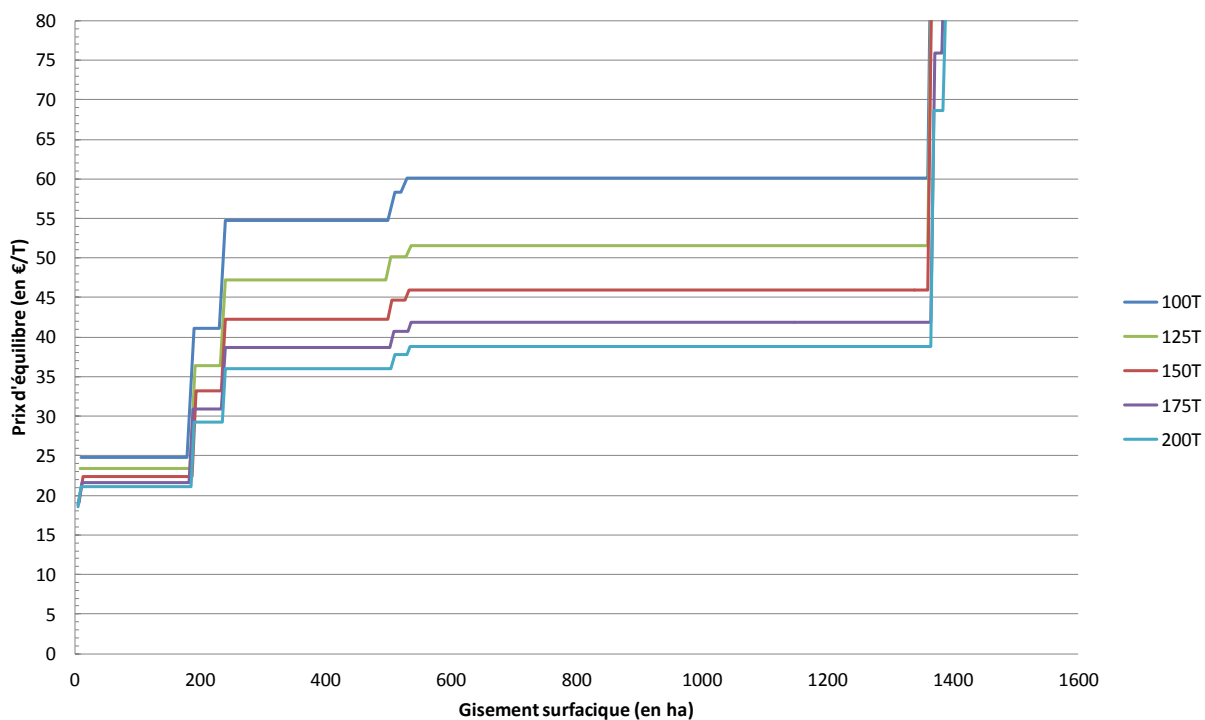


Figure 8. Courbes d'offre inverse de la canne à fibres pour différents niveaux de rendement de la canne à fibres (Scénario S6 – gisement surfacique).

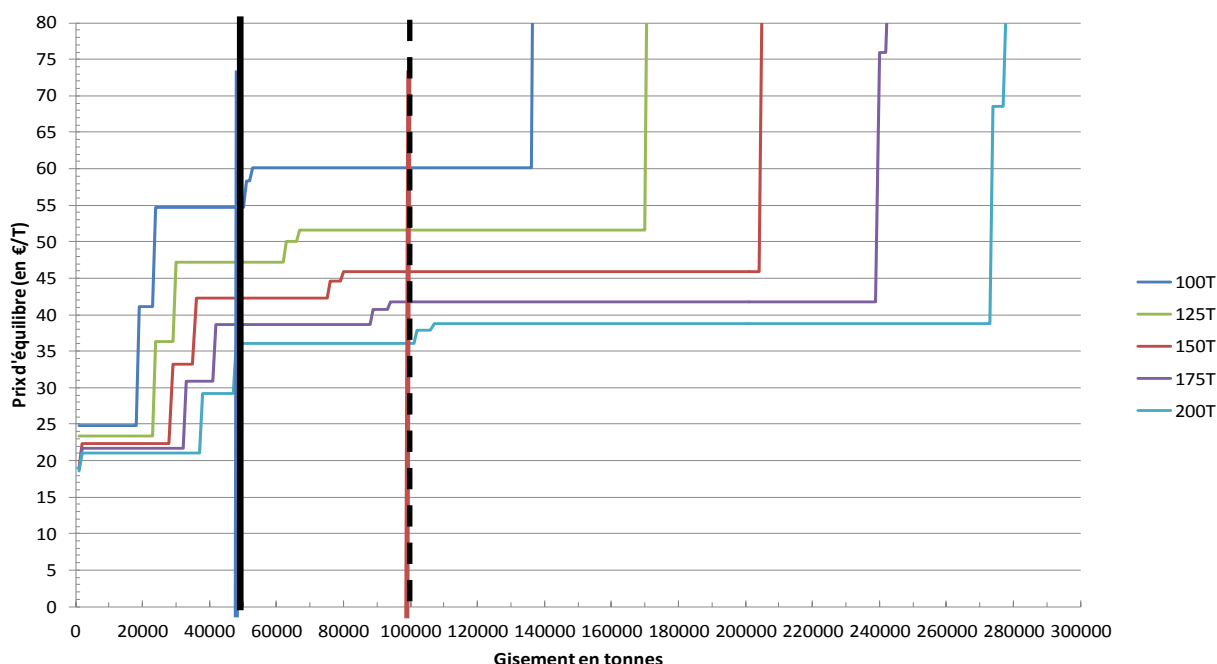


Figure 9. Courbes d'offre inverse de la canne à fibres pour différents niveaux de rendement de la canne à fibres (Scénario S6 – gisement en biomasse).

3.2.3 Discussion et perspectives, conclusions partielles

Synthèse

Le projet REBECCA (REcherche Biomasse Energie Canne CApesterre) a pour ambition d'identifier les conditions de développement d'une filière agroindustrielle « biomasse énergie » sur le territoire de la commune de Capesterre-Belle-Eau, située au sud de la Basse-Terre, en Guadeloupe. La filière a pour but de cultiver des cannes à sucre riches en fibre destinées à approvisionner une centrale électrique. Le présent rapport a été commandité à l'INRA dans le cadre du volet économique et environnemental de la phase 1 du projet REBECCA, dans le but d'estimer le gisement agricole potentiel pour la mise en place d'une telle filière.

Pour évaluer le gisement potentiel la démarche s'est appuyée sur un jeu de données décrivant le parcellaire actuel de la commune de Capesterre-Belle-Eau et sur un corps d'hypothèses relatives aux conditions d'implantation d'une culture de canne à fibres (CF). Pour estimer quantitativement le gisement agricole potentiel de CF, nous avons développé le simulateur GIZKAN qui permet d'évaluer le gisement surfacique et massique sous différents scénarios agro-économiques. Ces règles ont été établies suite à une analyse préalable de l'usage actuel des sols sur la commune et d'autre part des entretiens auprès des différents acteurs du secteur agricole dans la zone étudiée. Les paramètres d'éligibilité retenus sont relatifs aux caractéristiques des parcelles (usages, contraintes pédoclimatiques et topographiques, tenure foncière), à la rentabilité des spéculations en présence (marge à l'hectare), au prix d'achat de la canne à fibres (€/tonne), à la productivité surfacique (rendement agronomique en tonnes/hectare/an) et à l'existence de politiques économiques de soutien aux différentes filières.

Au bilan, douze scénarios différents (S1 à S12) ont été simulés pour deux valeurs de prix d'achat de la canne à fibres (45 et 65€/tonnes) et deux niveaux de rendements (100 et 150 tonnes/ha/an). Parmi ces 48 occurrences de scénarios, les scénarios S5 et S6 avec un rendement de 150

tonnes/ha/an (cf. résultat volet agro-variétal du programme REBECCA) et un prix d'achat de la canne à fibres de 45 €/tonnes (cf. volet économique du programme REBECCA sur la rentabilité industrielle) peuvent servir « de référence » car ils reflètent au mieux l'état actuel des connaissances, des marchés et du progrès technique.

Nos résultats montrent que le projet REBECCA intervient dans une situation où Capesterre-Belle-Eau comporte une SAU de près de 2400 hectares, surface en régression constante depuis plusieurs décennies. Les principaux usages du sol sont la culture de la banane (1235 ha), la canne à sucre (398 ha) et les jachères (336 ha). Environ 200 ha de cultures sont dédiés à la diversification agricole et au marché local. Le reste des surfaces s'apparente à des espaces pâturés (environ 120 ha), ou des friches et bois (80 ha).

Nos simulations de gisement réalisées avec GIZKAN montrent qu'en considérant un rendement de 150t/ha/an, un prix d'achat de 45€/t et les contraintes de mécanisation actuelles, le gisement surfacique serait de 238 hectares (scénario S5). Si l'on ajoute un soutien économique de 1000€/ha/an pour la canne à fibres (scénario S6), alors le gisement atteint 532 hectares et un volume de l'ordre de 80 000 tonnes de biomasse par an. Si l'on ôte les contraintes de mécanisation au scénario S5, le gisement surfacique s'établit à 407 hectares pour un volume de biomasse proche de 60 000 tonnes/an, sans subvention (S9).

Pour un prix d'achat de 45 €/tonne, on constate que le niveau de rendement et l'existence du soutien économique sont déterminants pour la formation du gisement. En considérant le scénario avec progrès de mécanisation (scénario S10), le gisement surfacique potentiel atteindrait 712 ha.

L'analyse transversale des scénarios montre bien le poids déterminant de quatre paramètres dans la formation du gisement : le rendement agronomique, le prix d'achat de la canne à fibres, l'existence d'un soutien à la conversion vers la canne à fibres et les possibilités techniques de mécanisation. En fonction des valeurs prises par ces paramètres le gisement peut varier d'un facteur 1 à 10.

Le scénario S6 avec un rendement de 150 tonnes/hectare et un prix d'achat de 45€/tonne aboutit à un gisement de 500 hectares environ. Un peu plus de la moitié du gisement provient des parcelles actuellement en canne à sucre (268 ha), ce qui représente la totalité des surfaces en canne. Ensuite le deuxième type de parcelles contribuant au gisement sont les parcelles en jachère (180 ha). Il est intéressant de constater que sur les 336 hectares de jachère disponibles, seuls 180 sont accessibles pour des raisons de compatibilité avec les contraintes pédoclimatiques et topographiques d'implantation et de récolte de la canne. Pour les mêmes raisons, seuls 7 ha de friches sont accessibles sur les 50 ha présents sur la commune de Capesterre-Belle-Eau. Un peu plus de 50 hectares du gisement potentiel proviendrait de surfaces en herbe (savane pâturée, prairie temporaire et permanente).

Enfin, l'analyse de l'évolution du parcellaire sous l'effet de l'introduction du nouveau débouché canne à fibres montre dans le scénario S6 que 26 hectares de « banane créole » pourraient « basculer » vers la canne à fibres. Si l'on souhaite « protéger » les cultures alimentaires commercialisées sur le marché local d'un changement d'usage du foncier correspondant, un moyen simple est de conditionner la prime à la conversion de 1000€/ha/an au fait que l'usage actuel du sol ne soit pas de ce type. Cette mesure permettrait dans ce cas de maintenir entièrement la banane créole qui resterait plus rentable que la canne à fibres. Dans ce scénario (S6), la totalité des surfaces en banane export, en ananas et en autres cultures (maraîchage, fleurs, cultures patrimoniales, etc.) n'est pas affectée par l'introduction de la filière agro-industrielle de production d'électricité à partir de canne à fibres, qui pourrait alors s'appuyer sur un gisement potentiel de 75 000 tonnes de biomasse par an. En fonction des paramètres d'efficacité énergétique de cette biomasse, une centrale de plus ou moins grande puissance pourrait alors être approvisionnée.

Limites de l'étude perspectives et besoin d'approfondissements

Cette étude fournit des résultats permettant de juger, du point de vue du gisement potentiel, des conditions de viabilité et des risques associés à la mise en œuvre d'une filière agro-industrielle de biomasse de cannes à Capesterre. Couplés aux données agro-variétales et industrielles du programme REBECCA, ces résultats peuvent éclairer le choix de dimensionnement de l'usine de production électrique. Pour mieux juger des modalités de mise en œuvre et préciser les niveaux des paramètres clés identifiés dans cette étude, il nous semble opportun que des recherches complémentaires soient entreprises. Tout d'abord, il semble nécessaire que les résultats de cette étude soit couplés à ceux des autres volets du programme REBECCA, tant pour l'évaluation de la rentabilité économique et des impacts environnementaux de la filière que pour le volet agro-variétal et industriel.

Concernant plus spécifiquement le gisement, plusieurs points méritent approfondissement. En premier lieu, afin de concevoir le schéma de filière optimum du point de vue économique et environnemental, il nous semble nécessaire d'entreprendre une modélisation dynamique et spatialement explicite du gisement. Cette modélisation devra prendre en compte les contraintes d'organisation logistique et la durabilité économique, agronomique et environnementale de la filière. En particulier il nous semble crucial de bien évaluer les contraintes d'accessibilité des parcelles pour la récolte en fonction du climat et de ses variations. Capesterre-Belle-Eau possède en effet une saison humide très marquée, pendant laquelle tout chantier mécanisé est impossible. En conséquence, il faudra s'attacher à définir des calendriers de plantation et de coupe compatibles à la fois avec le climat humide de la région capesterrienne mais aussi avec les contraintes de fonctionnement de l'usine.

Ensuite, nous avons vu que le rendement agronomique est un paramètre clé dans la formation du gisement. A l'heure du Grenelle de l'environnement et en vue de s'assurer de la durabilité et de la stabilité de ce rendement il nous apparaît indispensable de compléter l'analyse économique par une analyse agro-environnementale. Les modalités de gestion intégrale et durable de la matière organique des sols, de maîtrise des pollutions et des émissions de GES, de résilience face au changement climatique doivent être prises en compte pour s'assurer de la pérennité de la filière.

Concernant la modélisation du processus de choix des agriculteurs de se tourner vers la canne « fibre » (processus de substitution), nous avons considéré que celui-ci était le résultat d'une logique de maximisation de marge brute, tout en prenant en compte les contraintes agropédoclimatiques. Nous n'avons pas considéré les éventuelles contraintes propres aux différentes exploitations (main d'œuvre, investissements structurels, coûts de transaction, préférences individuelles).

Conclusions partielles

Bien que des pistes de leviers d'action en termes de politique agricole pour le soutien de la filière aient émergé de la présente étude, l'analyse pour l'aide à la décision publique au développement de la nouvelle filière doit être affinée dans le cadre d'un programme de recherche complémentaire. Cette analyse devra être faite après une évaluation approfondie du consentement à l'adoption des agriculteurs (nouveau paquet technico-économique), notamment en fonction des types de contrats qui leur seront proposés (prix d'achat, durée du contrat, partage des risques, existence d'un soutien à la conversion, encadrement technique, formule et modalités de paiement).

Quel fonctionnement de filière et quels contrats proposer aux acteurs? Ces questions devront impérativement être construites et traitées en interaction étroite avec les acteurs locaux.

3.3 Méthode et outils en vue de l'analyse de la rentabilité de la nouvelle filière

(Caroline Lejars, Jean-Louis Fusillier CIRAD)

3.3.1 Objectifs et attendus de l'étude

Les objectifs sont (i) de mettre en place une méthode et des outils d'analyse de la rentabilité de cette nouvelle filière (ii) puis, sur la base d'hypothèses d'organisation de filière, d'évaluer la faisabilité économique de deux scénarios d'organisation contrastés.

Plus particulièrement, il s'agit dans un premier temps de construire la méthode et de développer des outils qui pourront être utilisés dans la seconde phase du projet pour multiplier les simulations et dimensionner au mieux la future filière. Dans un second temps, il est nécessaire de rassembler les données et les hypothèses qui permettront de paramétrer les scénarios, puis de tester les outils pour évaluer la faisabilité de deux scénarios contrastés.

Après discussions avec le partenaire industriel et l'INRA en charge de l'estimation du gisement, les deux scénarios évalués sont :

- Une filière avec une usine d'une puissance de 5MW alimentée par de la canne fibre, auquel s'ajouterait un complément en terme de fuel (maximum 15%) et de biomasse résiduelle (paille de canne sucre, résidu d'égavage, résidu banane). Cette première filière est très localisée, pour réduire les coûts de transports.
- Une filière avec une usine d'une puissance de 10MW alimentée par de la canne fibre, auquel s'ajouterait un complément en terme de fuel (maximum 15%) et de biomasse résiduelle (paille de canne sucre, résidu d'égavage, résidu banane).

Ces deux scénarios sont pour une première approche suffisamment contrastés pour mettre en évidence des grandes tendances, notamment l'impact du dimensionnement de l'unité sur la rentabilité. Dans la suite du rapport, nous présentons :

- (i) la méthodologie et les outils qui ont été développés afin de simuler de multiples scénarios et de dimensionner au mieux la future filière
- (ii) l'ensemble des données recueillies pour permettre de paramétrer les scénarios
- (iii) les résultats obtenus pour quelques scénarios, calculés sur la base de nombreuses hypothèses. Les résultats finaux sont donc à analyser avec beaucoup de précaution
- (iv) Les suites à envisager pour l'analyse de la partie économique.

3.3.2 Méthode et outils développés

Les outils de simulation développés

Dans le cadre de cette étude, deux outils de simulation ont été développés. A ce stade, ils sont sous format Excel. Le premier permet d'évaluer d'une part, la rentabilité de cette nouvelle filière, via des indicateurs classiques comme le taux de rentabilité interne, la valeur actuelle nette ou le délai de retour sur investissements. D'autre part, des effets économiques du projet avec la valeur ajoutée créée localement et la distribution de revenus. Le second, développé avec Cann'elec développement, concerne le calcul du prix d'achat de l'électricité par EDF à partir des coûts complets.

Ces outils d'analyse ont été créés afin de pouvoir dimensionner au mieux la future filière. Ils permettent de simuler des scénarios d'organisation de filière variés. Ils visent également à faciliter les échanges entre l'industriel et les planteurs qui pourraient être parties prenantes du projet. Un des objectifs principaux est que les planteurs puissent s'approprier les modes de calcul et de négociation du prix de l'électricité.

En termes de données, pour le volet agricole, nous avons travaillé sur le même jeu de données que l'INRA et pour la partie transport, sur les données utilisées pour l'ACV. Pour la partie industrielle, Cann'elec developpement a proposé des schémas de fonctionnement pour une unité de production industrielle d'une puissance de 5 MW et une unité de 10 MW. Pour chaque unité, Cann'elec Developpement a fourni une estimation des investissements et des postes de charge.

Cadre d'analyse de la rentabilité de la filière

L'analyse de la filière se fait en prenant en compte 4 chantiers principaux : le chantier « transformation » de la matière première en électricité, le chantier « approvisionnement et transport » et le chantier « production » de la matière première, divisé en un chantier « plantation » et un « entretien culture ». Les données clés d'entrée de chaque scénario sont la capacité de production de l'usine, la surface cultivée en canne fibre, le rendement canne, le rendement de conversion de l'usine et le PCI de la matière première.

Les comptes « Canne » et les comptes « Industrie » sont ensuite détaillés. Les comptes de production et d'exploitation ainsi que les comptes de trésorerie avant financement et après financement sont également effectués à l'échelle de la filière. Les calculs sont faits sur une période de 25 ans, qui correspond à la durée d'amortissement de l'outil industriel. Le prix de l'électricité est une donnée exogène fixée à un niveau considéré comme acceptable par EDF.

Un outil (figure 12) a été mis au point afin d'évaluer (i) les postes de coûts (les coûts d'investissements, les coûts de production de la matière première, coût de transformation, cout de transport) et (ii) la valeur ajoutée et sa distribution à l'échelle de la filière, ainsi que les indicateurs de rentabilité du projet (Valeur actuelle nette, Taux de rentabilité interne, Délai de retour sur investissement). La rémunération des opérateurs (planteurs et industriel) est ici une donnée endogène calculée par le simulateur. L'outil développé sous Excel, facilite le traitement de nouveaux scénarios et permet d'effectuer une analyse de sensibilité sur quelques paramètres.

SIMULATEUR I. ANALYSE DE RENTABILITÉ (COUTS PRIVÉS)

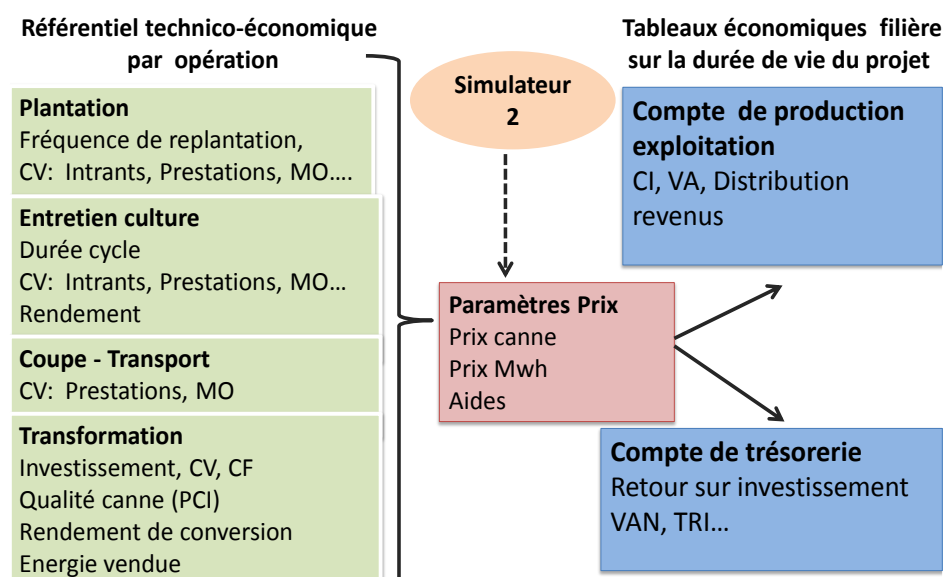


Figure 12 : Etapes et éléments clés de l'analyse de rentabilité

Dimensionnement de l'outil industriel et modalités de calculs du prix de l'électricité

L'électricité provenant de la biomasse autre que la biomasse issue du processus sucrier, dont la canne fibre, est vendue dans le cadre d'un marché négocié, intégrant une prime fixe, calculée de manière à couvrir les moyens de production (immobilisations et main-d'œuvre notamment) et une prime variable calculée de manière à couvrir les coûts d'entretien de l'outil industriel et les coûts d'achat des différents combustibles (canne fibre, biomasse complémentaire et fuel).

Nous avons, avec Cann'elec Développement, réalisé la maquette d'un outil permettant (i) d'une part d'estimer le montant des primes fixes en fonction du coût lié aux moyens de production et le montant de la prime variable en fonction d'un prix d'achat de la matière première (ii) d'autre part, de comparer ce prix calculé avec un prix du mix électricité de Guadeloupe. La figure 13 schématise son fonctionnement.

Cet outil constitue, à terme, « un outil de calcul du prix de revient de l'électricité », qui pourra être utilisé afin de négocier le prix de cette électricité avec EDF. Son objectif est de permettre aux agriculteurs parties prenantes du projet et à l'industriel de partager l'ensemble des éléments permettant le calcul et l'évaluation de ce prix de vente à EDF. Ce partage de l'information entre agriculteurs et industriel est important pour faciliter l'engagement des parties prenantes dans le projet.

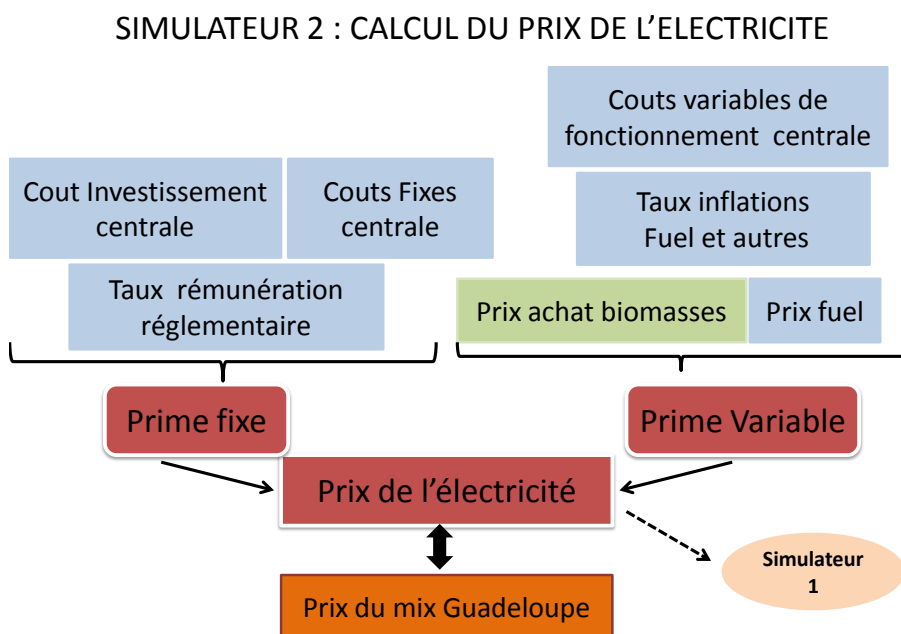


Figure 13 : Modalités de calcul du prix de l'électricité

L'outil est paramétré en intégrant un coût d'opportunité du capital pour l'industriel, dans le coût de revient Mwh. Il s'agit du taux de rémunération du capital investi fixé réglementairement à 11% , selon l'arrêté ministériel du 23 mars 2006. Pour la partie agricole qui, engage également du capital, notamment le foncier, le coût d'opportunité de ce capital est pris en compte dans la fixation du prix de la canne biomasse.

Par ailleurs, les calculs, effectués sur 25 ans, tiennent compte de l'inflation sur les coûts de production, d'une inflation spécifique sur les coûts du fuel et des variations liées à la montée en puissance de l'outil industriel les 4 premières années (avec une baisse progressive de l'utilisation du fuel utilisé pour pallier aux manques de matière première biomasse).

Scénarios testés et hypothèses de travail

Les données nécessaires au paramétrage et aux calculs de la rentabilité ont été discutées et collectées

- auprès de Cann'elec développement pour la partie industrielle,
- en phase avec l'INRA pour la partie agricole, afin que nos calculs soient effectués à partir des mêmes données. En phase 2, une validation de ces données par le groupe de travail « planteurs » devra être effectuée.

De façon à garantir, à ce stade la confidentialité, du processus industriel et des paramètres économiques liées à l'investissement et au fonctionnement de la centrale, certaines données ne seront pas détaillées, mais présentées de manière agrégée.

Dimensionnement et fonctionnement de l'unité industrielle

Les unités de production fonctionnent 7j/7 et 24h/24, sur 45 semaines par an (soit 7500 h). Un mois et demi d'arrêt pour maintenance est prévu. L'énergie qui doit être produite sur l'année est 37 500 MWh/an pour une unité de 5 MW et de 75 000 Mwh /an pour une unité de 10 MW.

Chaque mois, la quantité d'énergie produite doit être constante. Or, cette production dépend d'une source d'énergie primaire de qualité variable, notamment car le taux d'humidité de la biomasse est variable.

L'énergie primaire nécessaire a été décomposée en une énergie de base et une énergie d'évaporation variant en fonction de la qualité de la matière première (taux d'humidité). L'énergie de base a été calculée en prenant un rendement de conversion de base, lié à l'outil industriel, de 20 %. Ce rendement est généralement compris entre 18% et 22%, et dépend du taux d'humidité de la biomasse.

Plus précisément, le rendement global de conversion de la centrale dépend des rendements de chacun des éléments constitutifs.

Rendement de conversion = $100 \times N1 \times (1 - N2) \times N3 \times N4 \times (1 - N5)$

Avec N 1= rendement chaudière

N 2= prélèvement pour séchage et pré chauffage)

N 3= énergie valorisable en turbine

N 4 = rendement mécanique (turbine + réducteur + alternateur)

N 5 = auto consommation

Ce rendement de conversion dépend également du type de matière première, allant de 20 à 22% pour le fuel et de 16 à 18% pour la canne seule (d'après les premiers calculs effectués par l'industriel).

Nous ne rentrerons pas dans le détail des couts d'investissements. Le budget moyen par poste est détaillé dans le tableau 14.

Tableau 14 : Cout d'investissement dans les unités de production (en euros 2012)

| BUDGET PAR POSTE (euros) | Centrale 5MW | Centrale 10 MW |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| EQUIPEMENTS (MECANICAL) | 20 000 000 | 30 000 000 |
| GENIE CIVIL | 6 000 000 | 7 000 000 |
| ELECTRICITE PUISSANCE | 2 000 000 | 3 000 000 |
| DIVERS | 7 000 000 | 9 000 000 |
| | | |
| TOTAL INVESTISSEMENT | 35 000 000 | 49 000 000 |

On note l'importance de l'économie d'échelle liée à l'amortissement de l'usine puisqu'une unité plus puissante permettant de doubler la production, représente un coût supplémentaire d'investissement de 40%. Dans les différents comptes, nous avons considéré que les

investissements étaient amortis sur 25 ans. Un taux de renouvellement a été pris en compte pour chaque type de matériel.

Au niveau industriel, les produits sont exclusivement liés à la vente de l'électricité. Le prix de vente de l'électricité a été estimé pour les deux scénarios de 5MW et 10 MW, à partir des calculs de charges, en utilisant l'outil dédié à cet effet. Les résultats (ci après) restent dépendants du jeu de données utilisé. Les charges comprennent les charges fixes liées principalement à la masse salariale, des charges liées l'entretien, aux assurances, taxes et impôts, et les charges variables liées à l'achat de la matière première.

Sources d'apports en biomasse

La quantité de canne-fibre nécessaire pour faire fonctionner l'unité est calculée à partir des surfaces disponibles, pour un rendement donné. Les résultats obtenus dans les expérimentations des nouvelles variétés du programme REBECCA permettent de faire des hypothèses de rendement. Les rendements issus des meilleures variétés en première année de culture, en petites parcelles et en année favorable, ont été supérieurs, de l'ordre de 220 t/ha/an de matière fraîche totale (Chopart 2012, Chopart et Bachelier 2012). Pour anticiper une situation de culture en grandes parcelles d'agriculteurs, un coefficient d'abattement compris entre 30 et 20 % a été affecté à ces résultats expérimentaux.

Par ailleurs, l'unité de productions sera également fournie en fuel, pour pallier aux périodes où l'approvisionnement en canne-fibre sera impossible. La quantité de fuel utilisée par l'unité ne doit pas être supérieure à 15% du total des apports pour rester dans le cadre d'une filière biomasse-énergie.

Enfin, l'unité industrielle sera également approvisionnée par d'autres sources de biomasse, notamment de la biomasse résiduelle, issue par exemple de paille de canne à sucre, de bois d'élagage ou de résidus de bananiers. Ces autres sources de biomasse permettent de diversifier les apports et d'accéder, à priori, à des sources de biomasse à moindre coût. Elles constituent un complément quantitatif à la ressource principale, la canne combustible.

Nous avons donc considéré que l'unité industrielle serait fournie, en année de croisière, par :

- 15% de fuel, avec un PCI de 11,74 MWh/T
- La quantité de canne-fibre en rendement Matière Verte (MV) calculée à partir des surfaces disponibles, pour un rendement annuel variant entre 150T/ha et 180T/ha et pour un taux de matière sèche de 31,5 %. Afin d'effectuer les conversions en énergie, la biomasse est ramenée à une quantité de canne fibre à 50% (préséchée).
- Un tonnage de matière sèche issue de résidus de récoltes divers. Ces résidus pourraient être de la paille de canne à sucre, des cannes à sucre restées au champ à la fin des campagnes sucrières, du bois d'élagage, des résidus de banane. A ce stade de l'étude, ne connaissant ni la qualité, ni les tonnages de matière première mobilisables, nous avons raisonné en tonnage de matière sèche globale.

Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) de la biomasse (quelle qu'elle soit) à 55 % d'humidité (permettant la combustion) est de l'ordre de 1,7 MW.h/tonne. Plusieurs scénarios ont été testés, avec des quantités et des sources de biomasse différentes (tableau 15).

Les calculs ont été faits en tenant compte d'une montée en puissance les 4 premières années, l'année de croisière étant atteinte la 4^{ème} année. Les 3 premières années, c'est essentiellement le fuel qui permet de compenser l'insuffisance des apports en biomasse.

Les quantités de fuel et de canne fibre nécessaires peuvent varier chaque mois, en fonction de la qualité et de la disponibilité de la canne fibre.

Tableau 15 : Différents scénarios d'apport en biomasse

| Scénario | Taille unité | Apports |
|----------|--------------|---|
| 1a | 5MW | 85 % Canne fibre + 15% fuel |
| 1b | 5MW | 60% Canne fibre + 15% fuel + 25% Autres biomasses |
| 1c | 5MW | 50% Canne fibre + 15% fuel + 35% Autres biomasses |
| 2a | 10 MW | 85 % Canne fibre + 15% fuel |
| 2b | 10 MW | 60% Canne fibre + 15% fuel + 25% Autres biomasses |
| 2c | 10 MW | 50% Canne fibre + 15% fuel + 35% Autres biomasses |

Paramètres de la production de canne-fibre

Les simulations permettent de faire varier la durée du cycle de culture (pour tester l'effet de récolte à 8 ou 12 mois notamment). Elles ont été faites dans un premier temps sur la base d'un itinéraire technique proche de celui de la canne à sucre.

Pour chacun des chantiers, les postes de charge ont été évalués sur la base des données issues du référentiel « canne à sucre » de la Chambre d'Agriculture. Les données agrégées utilisées sont données dans le tableau 16.

Tableau 16 : Charges liées à l'entretien des cultures.

| | unité | Coût /ha cycle € |
|--------------------------------|-------|---------------------|
| Engrais entretien NPK | t | 650 |
| Herbicide post émergence | l | 170 |
| Herbicide balise | | 40 |
| Herbicide pré-émergence | | 20 |
| Total Intrants | | 880 |
| désherbage pré-levée méca | ha | 110 |
| épandage engrais | ha | 55 |
| sarclage mécanique | ha | 55 |
| | | |
| Total Prestations | | 220 |
| TOTAL ENTRETIEN CULTURE | | 1100 |

Les investissements dans la plantation prennent en compte un surcout dépendant du précédent cultural.

Les données prises en compte pour les charges de coupe, chargement, transport (tableau 18) sont des données moyennées provenant des SICA. Les subventions liées au transport des canne à sucre n'ont pas été incluses. Nous avons par contre conservé la subvention liée au handicap naturel de 150 euros/ha. Enfin, le cout de transport moyen a été évalué en tenant compte du fait que l'unité de production serait à proximité des parcelles (ce qui n'est pas le cas pour les cannes à sucre provenant actuellement de la zone de Capesterre).

| | unité | Quantité /ha | Prix unitaire € | Coût /ha hors subvention € | Subvention /ha € |
|--|-------|-----------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|
| Labour | ha | 1 | | 267 | |
| Sillonage | ha | 1 | | 69 | |
| Pulvérisage | ha | 1 | | 91 | |
| Amendement | t/ha | | | 0 | |
| Herbicide pré-émergent | L/ha | | | | |
| Epandage herbicide + divers | | | | | |
| Surcoût lié au précédent cultural | | | | | |
| Sous-Total Préparation du sol | | | | 427 | |
| Boutures | t/ha | 8 | 50,25 | 402 | |
| Transport-chargement boutures | | | | 213 | |
| Plantation boutures manuelle | | | | 396 | |
| Total Investissement plantation | | | | 1438 | 1275 |
| amortissement par cycle | | | | 221 | 196 |
| amortissement par année | | | | 288 | 255 |

Tableau 17 : Charges liées à la plantation

| | unité | cout unitaire non subventionné |
|----------------------------|---------|-----------------------------------|
| Coupe chargement mécanique | euros/t | 10,63 |
| Transport (moyen) | euros/t | 5,77 |
| | | |
| Total | | 16,4 |

Tableau 18 : Estimation des couts de transport et de chargement sur la zone

Hypothèses sur les prix

Le prix d'achat de la matière première canne fibre est une donnée clé pour calculer (et valider) la surface affectable à la culture donc la taille du gisement disponible. Le graphe de courbe d'offre (figure 14) produit par l'INRA permet de définir ce point d'entrée de la simulation économique. Une hypothèse centrale du modèle d'offre est que les planteurs adopteront la culture de canne fibre lorsque la marge dégagée dépasse celle des cultures alternatives. Ce graphe présente trois paliers clés qui peuvent orienter les scénarios. L'entrée dans la filière se fait à hauteur de 200 ha pour un prix canne de 28 à 35 €/t selon le rendement. Cela est insuffisant pour fournir la quantité de biomasse nécessaire au fonctionnement d'une unité de 5MW. Une forte augmentation du prix canne, entre 40 à 65 €/t (la fourchette s'agrandit avec les divers rendements) permet d'accroître la surface disponible à 600 ha. Cela peut satisfaire largement les besoins d'une unité de 5 MW, voire plus si les rendements sont très bons. Troisième palier, on sature la surface possible en canne (1500 ha compte tenu notamment des contraintes du milieu physique) avec une toute petite hausse du prix (à peine + 5 €/t).

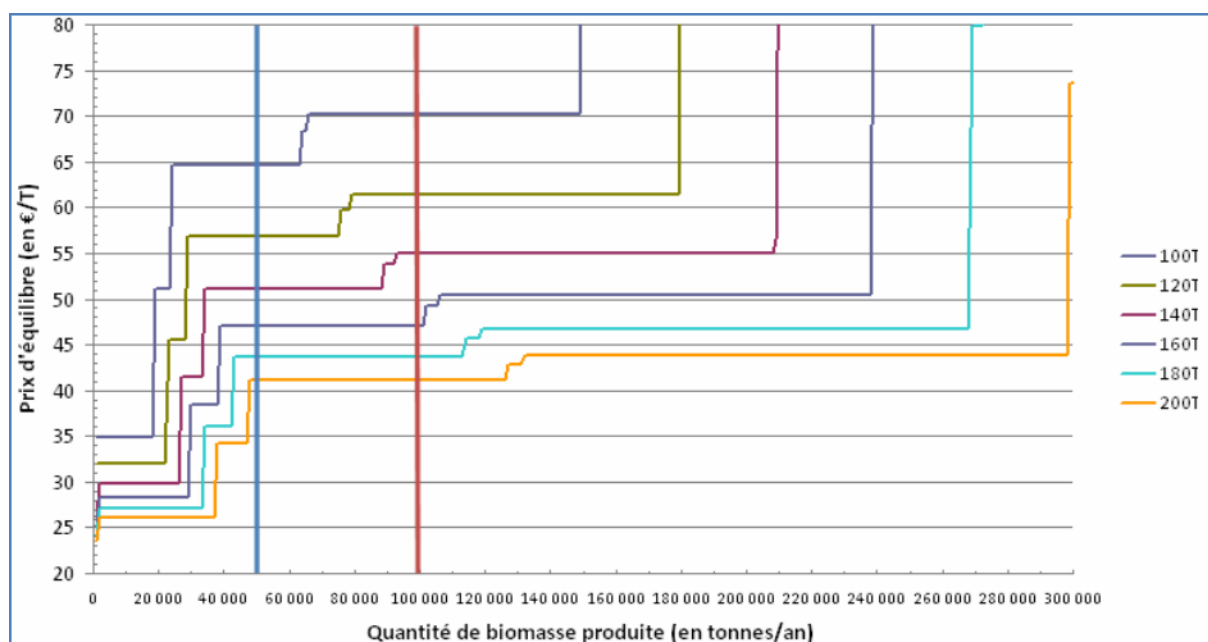


Figure 14 : Courbe d'offre inverse du gisement en canne fibre pour différents niveaux de rendement de la canne fibre dans les conditions du scénario de référence (approvisionnement sur la zone de Capesterre -source : INRA).

Dans nos scénarios, le rendement moyen de la biomasse fraîche totale (humidité à la récolte) a été fixé entre 150T/ha /an et 180T/ha/an.

Dans ce cas ; les fourchettes de prix de la canne fibre permettant de dégager la surface ciblée pour approvisionner une unité d'au moins 5 MW sont entre 45 et 50 euros/t. Pour des rendements supérieurs, la fourchette d'entrée peut être plus faible. Par la suite, on travaillera avec cette fourchette de prix d'entrée entre 43 et 50 euros/t.

Hypothèses sur le prix du fuel et des autres biomasses

Le prix du fuel a été fixé à 700 euros/T en 2012. Une inflation de 5% est prise en compte.

Le prix de la biomasse résiduelle a été fixé à 30 euros/t. Une inflation de 2%/an est prise en compte.

L'électricité provenant de la biomasse autre que la biomasse issue du processus sucrier, dont la canne fibre, est vendue dans le cadre d'un marché négocié, intégrant une prime fixe, calculée de manière à couvrir les moyens de production (immobilisations et main-d'œuvre notamment) et une prime variable calculée de manière à couvrir les coûts d'achat de la biomasse et de tout autre combustible. Actuellement, la somme de ces deux paramètres peut être négociée à un niveau de prix compris entre 200 et 240 euros/mw.h.

Notons également que le prix d'achat du mw.h biomasse ne peut être inférieur, dans le cadre d'un marché négocié, au prix moyen des prix obtenus lors du dernier appel d'offre CRE, soit 145 euros/mw.h (c'est une obligation liée à la loi d'orientation pour l'outre mer).

3.3.3 Premiers résultats

A ce stade, les résultats chiffrés obtenus doivent être considérés relativement les uns aux autres et non en tant que résultats absolus. Ils permettent de fournir quelques paramètres clés de la faisabilité économique. Nous ne détaillons dans cette partie que les éléments clés de la faisabilité.

Evaluation du prix de l'électricité pour différents scénarios

Détermination du prix de l'électricité en fonction de la taille de l'unité et des sources d'apports en biomasse

La détermination du prix auquel l'électricité doit être vendue pour rentabiliser la centrale et apporter une rémunération incitative aux planteurs est un des premiers éléments permettant de déterminer la faisabilité du projet. Ce prix est calculé à partir d'une prime fixe couvrant l'investissement et la rémunération du capital investi (selon un taux réglementaire) et d'une prime variable couvrant les charges variables et l'achat de la matière première.

Des fourchettes de prix ont été calculées en fonction de fourchette de prix d'achat de la canne, pour différents scénarios d'apport de biomasse. Les résultats sont présentés ci-après (tableau 19). Les simulations ont été réalisées en prix courant. Le détail des calculs est donné dans Lejars et Fusiller, 2012).

Pour effectuer ces calculs, nous avons fixé les principaux paramètres d'entrée comme suit :

- 7500 h/an de fonctionnement de la centrale
- Rendement canne = 165 t/ha à 70% d'humidité
- PCI : 1.7MWh/t pour une biomasse à 55% d'humidité
- Rendement conversion = 20%
- Prix autres biomasses= 30 euros/t
- Prix fuel = 700 euros/

Tableau 19 : Prix de revient de l'électricité pour différents scénarios (BASE 2012)

| Données d'entrée | | | | Données de sortie | |
|------------------|--------------|---|----------------------|----------------------------|------------------------------|
| Scénario | Taille unité | Apports | Prix canne (euros/t) | Taille Gisement nécessaire | Prix électricité (euros/MWh) |
| 1a | 5MW | Canne fibre + 15% fuel | 43 –50 | 650 ha | 300 -340 |
| 1b | 5MW | Matière sèche (65% Canne fibre + 35% Autres) + 15% fuel | 43 – 50 | 450 ha | 270-310 |
| 1c | 5MW | Matière sèche (50% Canne fibre + 50% Autres) + 15% fuel | 43-50 | 350 ha | 250-270 |
| 2a | 10 MW | Canne fibre + 15% fuel | 43 – 50 | 1250 ha | 275-315 |
| 2b | 10 MW | Matière sèche (65% canne fibre + 35% Autres) + 15% fuel | 43 – 50 | 950 ha | 225-285 |
| 2c | 10 MW | Matière sèche (50% Canne fibre + 50% Autres) + 15% fuel | 43 – 50 | 800 ha | 225-245 |

Les résultats des calculs avec les hypothèses retenues montrent que les scénarios 1a et 2a ne permettent pas d'atteindre un prix de l'électricité acceptable pour EDF aux conditions de négociations actuelles du prix de l'électricité qui se situent entre 220 et 240 €/Mwh. Les scénarios couplant un apport en canne-fibre et d'autres apports de biomasse (scénarios 1b, 1c, 2b, 2c)

s'approchent des prix négociables. Une unité de 5 MW ne fonctionnant qu'avec de la canne-fibre serait donc difficilement rentable sans nouvelle subvention à la filière, et demanderait une importante disponibilité en terme de surface cultivable.

Un scénario avec une unité de 10 MW approvisionné avec plusieurs types de biomasse (scénario 2c) permet d'atteindre un prix de l'électricité acceptable pour EDF aux conditions actuelles de négociation. Un scénario à 5MW approvisionné avec plusieurs types de biomasse (scénario 1c) génère un prix de l'électricité supérieur aux bases actuelles de négociation avec EDF. Toutefois, avant de porter toute conclusion hâtive, ce prix et son évolution doivent aussi être comparés au prix du mix Guadeloupe.

Comparaison à l'évolution du prix du mix électricité de Guadeloupe

Compte tenu de l'inflation attendue à moyen terme sur le prix du fuel, supérieure à l'inflation du prix de l'électricité issue de la biomasse, le prix de l'électricité issue de la centrale « canne-fibre » doit être comparé à celui issu du mix Guadeloupe.

Dans le cas du scénario 1c par exemple, le prix de l'électricité produit par la centrale deviendrait inférieur à celui du mix Guadeloupe après 9 ans (figure 15).

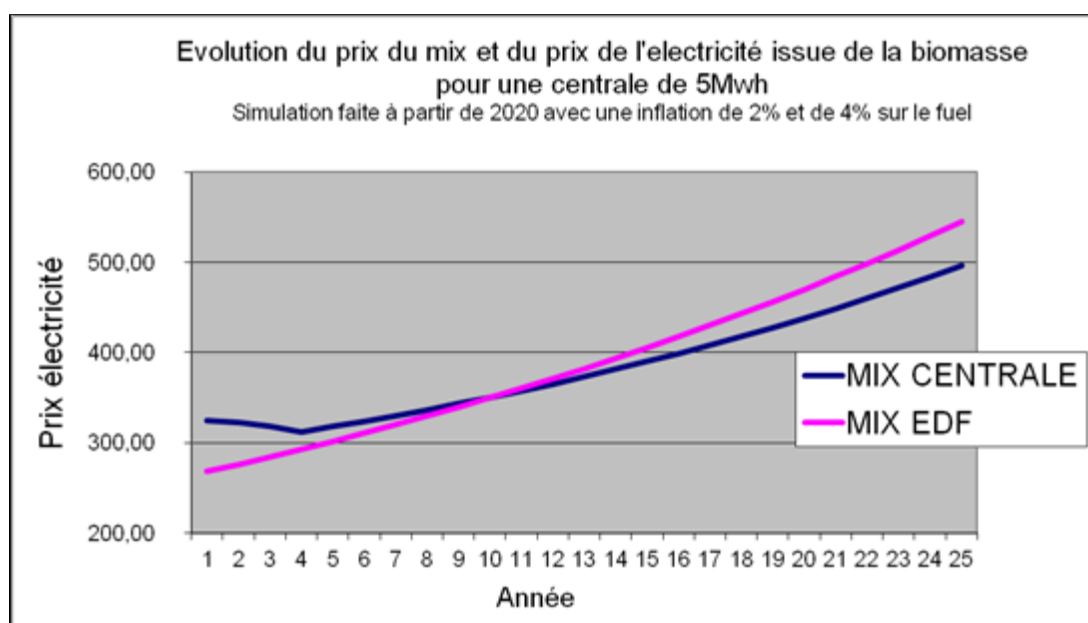


Figure 15 : Evolution du prix du mix et du prix de l'électricité pour le scénario 1c (BASE 2020)

Ainsi l'évolution probable du prix de l'électricité issue de la centrale tend à montrer que, sur le moyen terme, une petite unité de 5MW (scénario 1-C) aurait un intérêt économique. Dans ces conditions, le projet 5 MW pourrait devenir un projet permettant de produire de l'électricité à un prix acceptable par EDF.

Analyse de la rentabilité de la future filière

Valeur actuelle nette, taux de rentabilité interne et délai de retour sur investissement

Compte tenu des résultats précédents et des discussions avec les différents partenaires, nous avons plus particulièrement évalué la rentabilité de 2 scénarios

- Scénario 1c : Une filière avec une usine d'une capacité de 5MW alimentée par un gisement de 350 ha de canne fibre. Cette première filière est très localisée, pour réduire les coûts de transport.

- Scénario 2c : Une filière avec une usine d'une capacité de 10MW alimentée par un gisement de 800 ha.

Pour chacun de ces scénarios, nous avons fixé (arbitrairement, en attendant les résultats de la phase 2), une fourchette de prix d'achat de la canne combustible entre 43 et 50 euros/t. La rentabilité est considérée globalement pour l'ensemble de la filière à partir d'un compte consolidant les parties agricole (production de canne) et industrielle (production d'électricité) Il s'agit d'une rentabilité intrinsèque du projet donc calculée avant financement. Les subventions aux investissements sont toutefois incorporées dans le calcul.

Les résultats des calculs effectués avec les outils présentés et en utilisant les variables d'entrée présentées dans la partie 1.2, ont abouti aux résultats synthétiques et provisoires décrits dans le tableau 20.

Tableau 20 : Résultats économiques pour les 2 scénarios

| Données d'entrée | | Indicateurs économiques | | | |
|------------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Scénario | Puissance | Taux de rentabilité interne (TRI) | Valeur actuelle nette (à 5%) | Délai de retour sur investissement | Cash flow net avant Fi année de croisière val constante 2011 |
| N° | MW | % | M€ | Années | M€ |
| 1c | 5 | 9-11 | 6 - 10 | 8 - 10 | 2 – 2,6 |
| 2c | 10 | 11-13 | 7 - 12 | 6 - 8 | 3,6 – 4,4 |

Scénario 1c

: En terme de rentabilité, la VAN (au taux d'actualisation de 5%) est comprise entre 6 et 10 M€, le TRI entre 9 et 11%, le retour sur investissement entre 8 et 10 ans. Afin que la nouvelle filière soit rentable, le prix électricité doit être supérieur à 240 euros/T, ce qui est supérieur à la fourchette actuelle proposée par EDF. Ce prix devient toutefois inférieur à celui du mix Guadeloupe après une dizaine d'années.

Scénario 1c

Il pourrait être un projet rentable, sous certaines conditions avec un prix de l'électricité négocié au plus fort. Le cash flow (avant financement) dégagé par le projet en année de croisière (n+4), qui se répartit entre la rémunération des planteurs (paiement de la canne) et de l'industriel (paiement d'une marge et des intérêts du capital investi), s'établit entre 2 et 2.6 M€. On note une tendance à l'érosion de ce cash flow au fil des années en raison de l'augmentation plus rapide du prix relatif du FOD qui compte pour 15% dans l'apport d'énergie, dans ce scénario. Ainsi le cash flow tomberait à moins de 2 M€ à partir de l'année 15 et finirait à moins de 1 M€ en année 24.

Scénario 2c : la rentabilité de l'outil industriel est atteinte pour un prix de l'électricité compris entre 225 et 245 euros/T. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI avant investissement) est compris entre 11 et 13%, le retour sur investissement est compris entre 6 et 8 ans, et la valeur actuelle nette (VAN) est comprise entre 7 et 12 M€

Plus généralement, 10 MW semble être un projet rentable sous certaines conditions pouvant générer un prix attractif pour le producteur (+ de 50 euros/T). Le cash flow annuel généré s'inscrit dans une fourchette de 3,6 à 4,4 M€ en période de croisière.

Sensibilité des revenus des opérateurs au prix de la canne

A l'aide des outils développés, il est possible d'analyser la répartition des revenus de la filière entre l'industriel et les agriculteurs, pour différents prix d'achat de la canne-fibre et pour différents niveaux de rendement. Le tableau 21 présente les marges des agriculteurs avant

subventions et les résultats d'exploitation de la Centrale, pour différents niveaux de prix et de rendements, dans le cas du scénario 1c.

Tableau 21 : Evolution des revenus, pour les parties industrielle et agricole, en fonction du prix d'achat de la matière première et du rendement moyen par an de la canne –Scénario 5 Mwh type 1c – année de croisière n+4 – base 2012

| Rendement canne fibre | Prix achat canne combustible Euros/T | Prix de vente électricité Euros/Mwh | Résultat net centrale (KE) avant frais financiers | Marge nette agricole (sans subventions) (KE) |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 150 T/ha | 43 | 250 | 600 | 800 |
| 150 t/ha | 50 | 270 | 200 | 1200 |
| 180 t/ha | 43 | 250 | 600 | 1060 |
| 180 t/ha | 50 | 270 | 300 | 1500 |

Effets directs de la filière sur l'économie locale

La filière apporte une contribution à l'économie locale à travers la création de valeur ajoutée, distribuée en salaires, revenus d'exploitation (avec les emplois associés), et enfin en taxes pour les collectivités. Ces effets sont présentés pour les 4 scénarios dans le tableau 22:

Tableau 22 : Effets économiques directs de la filière - Flux annuels en période de croisière (années 5 à 10) en Millions d'euros valeur 2012

| Scénario | Valeur ajoutée brute | Masse salariale (usine) | Revenus Planteurs+ transporteurs | Taxes nettes | Emplois Centrale (équivalents temps-pleins) |
|----------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|---|
| 1c | 2 600 000 | 1 000 000 | 1 400 000 | 80 000 | 40 |
| 2c | 4 500 000 | 1 000 000 | 3 400 000 | 130 000 | 40 |

Pour la centrale, les équivalents temps pleins sont ventilés dans le tableau suivant 23

Tableau 23 : Emplois générés par la Centrale

| | postés | équipes | sous total | jour | total |
|--------------------|--------|---------|------------|-----------|-------|
| réception biomasse | 3 | 2 | 6 | 1 | 7 |
| pesage biomasse | 1 | 2 | 2 | | 2 |
| pilotage chaudière | 2 | 4 | 8 | | 8 |
| Turbo | 1 | 4 | 4 | | 4 |
| Divers | 3 | 4 | 12 | | 12 |
| Entretien | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| | | | | | 38 |
| | | | | directeur | 1 |
| | | | | adjoint | 1 |

3.3.4 Sensibilité à quelques facteurs

Les résultats obtenus sont sensibles à plusieurs paramètres. Les analyses de sensibilité n'ont pas été finalisées dans cette première étude. Toutefois, trois variables clés ont été identifiées comme influençant en grande partie les résultats obtenus : le rendement de la canne-fibre, son prix, le rendement de conversion électrique dépendant du taux d'humidité, et la quantité de fuel apportée en complément de la biomasse.

Tout d'abord le rendement impacte directement la biomasse disponible et tous les critères de rentabilité. Pour l'instant, les scénarios testés prennent un rendement fixe, mais il est possible, grâce aux outils disponibles, de multiplier les scénarios pour obtenir des fourchettes de résultats en fonction des rendements. Le niveau de ce rendement en biomasse sera précisé peu à peu grâce aux résultats des expérimentations agronomiques en cours. D'ores et déjà, il apparaît qu'un rendement moyen annuel de 150 t/ha constitue un seuil minimal pour dégager une rentabilité

Le rendement de conversion électrique, résulte du taux d'humidité de la biomasse et de l'outil mis en place, est également un facteur clé de la rentabilité économique et environnementale du système. Les valeurs moyennes et la gamme de variation du taux d'humidité est, comme le rendement, en cours d'étude.

Enfin, la quantité de fuel apportée influe fortement sur la rentabilité de filière. On peut noter qu'avec des taux d'apport en fuel de 12% au lieu de 15 %, les VAN et les TRI augmentent fortement notamment après quinze ans, compte tenu de l'inflation sur le fuel, plus forte que sur la biomasse. Le prix de l'électricité nécessaire pour assurer la rentabilité du projet industriel baisse également. Il est important de bien dimensionner la taille de l'unité en fonction de la taille du gisement et surtout d'assurer les apports en biomasse. Toutefois, diminuer la quantité de fuel apporté est délicat dans la mesure où le fuel permet (i) de compléter la ressource, (ii) de sécuriser l'approvisionnement, notamment en période de fortes pluies, interdisant l'accès aux champs (iii) et de réguler le fonctionnement de la chaudière si la biomasse est, ponctuellement, trop humide.

3.3.5 Conclusion

La démarche, les outils et les scénarios présentés, relatifs à une nouvelle filière sont encore en cours de développement. Les outils sont actuellement indépendants, rendant difficile la multiplication des scénarios et les tests de sensibilité. La mise en connexion des outils présentés et de la base de données agronomique, est prévue. Cela facilitera les tests de scénarios variés et des études de la sensibilité des indicateurs opérationnels aux différents paramètres d'entrée. Ceci permettra d'optimiser le dimensionnement de la future filière.

Ces outils ont néanmoins déjà permis, une meilleure connaissance du champ des possibles en matière de gisement disponible, de puissance de l'installation électrique et de niveau et conditions de rentabilité. A cet égard, il a été montré la forte influence de la part du fuel et de la biomasse résiduelle sur la rentabilité économique d'une unité dédiée à la production d'électricité par combustion de biomasse de canne-fibre.

Une réflexion plus approfondie sur la disponibilité et l'utilisation d'autres sources de biomasse serait souhaitable. Ces autres sources de biomasse, essentiellement des résidus de récolte, permettraient de mieux rentabiliser le projet (compte tenu d'un prix d'achat plus faible) et seraient utiles pendant d'éventuelles périodes où l'approvisionnement en canne serait impossible ou difficile.

Au-delà des quelques résultats provisoires présentés, le volet « économie-environnement » du projet a permis de faire converger les thématiques de divers spécialistes vers un même objectif : la définition du degré d'intérêt économique et environnemental d'une toute nouvelle filière. Les outils utilisés ont déjà facilité cette convergence et devraient la rendre productrice d'informations à la fois scientifiques et opérationnelles.

3.4 Analyse du cycle de vie de la filière canne fibre en Guadeloupe

(Thomas Merle, CIRAD)

3.4.1 Introduction

L'étude environnementale des différentes pistes prospectives permet de justifier ou non le soutien au développement de la filière canne fibre par l'analyse de résultats d'indicateurs d'impact potentiels. La méthode choisie pour réaliser cette analyse est la méthodologie de l'Analyse du cycle de vie (ACV) décrite dans Jolliet (Jolliet, 2010). La base de données européenne Ecoinvent (Frischknecht, 2007) utilisée pour l'étude respecte les recommandations de l'International Standards Organisation (ISO 14000-14044). Afin d'établir différents scénarios de fonctionnement aussi bien au niveau de la production agricole que de la production industrielle, l'outil REBECCA-ACV a été développé spécifiquement pour analyser le profil environnemental de différents scénarios.

Une description détaillée de la méthodologie adoptée, des sources, des hypothèses utilisées ainsi que des calculs réalisés pour aboutir aux résultats d'analyse environnementale par l'outil REBECCA ACV apparaît dans le guide de l'outil REBECCA-ACV (Merle, 2012).

Au regard des objectifs de l'étude, l'outil permet:

- de calculer le profil environnemental de l'électricité issue de canne combustible,
- de comparer différents scénarios sur la base des performances environnementales,
- d'identifier les points sensibles en vue d'optimiser le système et
- de comparer chacun des scénarios envisagés à la production d'électricité locale.

Chaque scénario peut être défini à partir d'un grand nombre de paramètres. A ce titre la définition des deux scénarios de référence relatifs à la puissance industrielle (5 et 10 MW) fait l'objet de la première partie de cette synthèse. L'itinéraire technique considéré restera fixe sur l'ensemble des variantes envisagées et est présenté en annexe (Merle, 2012)

Sont déclinées dans une deuxième partie les différentes variantes étudiées dans le cadre d'une analyse de sensibilité des paramètres clé du système. D'autres potentialités de l'outil apparaîtront ici. Cette partie sera suivie d'un récapitulatif des fonctionnalités de l'outil et des perspectives d'amélioration des résultats.

Les résultats sont à manipuler avec prudence. Un effort de contextualisation a été mené et doit être prolongé afin de préciser autant que faire se peut un maximum d'hypothèses posées en amont de l'analyse (facteurs d'émissions, provenance des intrants, ...). Les résultats environnementaux dépendent en effet de nombreux paramètres et leur interprétation doit tenir compte des choix effectués et de la qualité des données d'entrée. Une première partie détaillera brièvement la prise en compte par l'ACV du système étudié.

3.4.2 L'ACV d'une filière canne combustible : définition objectifs

Le système considéré intègre l'ensemble des intrants et des ressources consommés ainsi que les polluants émis depuis la production de cannes jusqu'à la production d'électricité, en 3 phases :

- la phase de culture et de production des cannes, définie par un gisement potentiel, un rendement variétal et un itinéraire technique (choix variétal, durée de production, quantité d'intrants, choix du matériel agricole,...),

- la phase de transport, tenant compte du mode de transport utilisé, de la quantité de canne à transporter et d'une distance moyenne à la parcelle,
- la phase de transformation industrielle de la biomasse en électricité, basée sur le rendement de conversion électrique et le dimensionnement de l'unité industrielle (durée de fonctionnement annuel, infrastructure).

Ont été exclus du système l'impact relatif à l'infrastructure agricole et aux produits chimiques industriels.

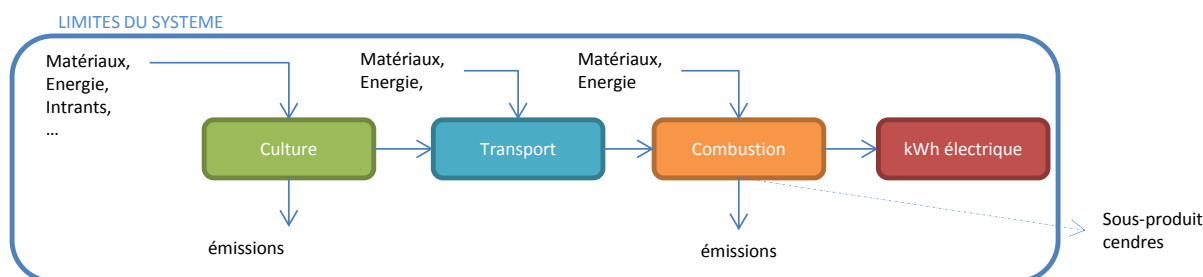


Figure 10 : Schéma simplifié du système pris en compte pour l'étude ACV de la filière

L'unité fonctionnelle du système est le kWh électrique produit et permet de comparer l'efficacité de chacun des scénarios évalués sur la base d'une unité commune. Chacun des indicateurs calculés est présenté dans son unité propre ramené au kWh électrique.

Les indicateurs environnementaux calculés dans l'outil proviennent de la méthode d'analyse environnementale Recipe Midpoint (Goedkoop, 2009). Parmi l'ensemble des 20 indicateurs, 7 communément admis dans les études ACV énergétiques pour présenter les profils des 2 scénarios sont retenus dans cette synthèse, permettant une analyse multicritère.

La production de canne étant entièrement dédiée à la production électrique, 100% de l'impact environnemental est comptabilisé dans les résultats finaux. Ce point rendra difficile la comparaison avec d'autres systèmes de production électrique à partir de bagasse dont l'impact est majoritairement attribué au sucre, allégeant d'autant le co-produit « électricité ».

3.4.3 Méthodes et résultats

Définition du scénario de base

Les principaux paramètres retenus pour l'élaboration des deux scénarios de référence sont présentés dans le Tableau 1.

Le paramètre « Gisement » 5MW est pris en cohérence avec un scénario spécifique issu de GisCan fourni par l'INRA. Une extrapolation a été faite pour évaluer la filière à 10MW en faisant passer le gisement de 506 ha à 1012 ha.

Le rendement moyen de la biomasse fraîche plante entière a été établi à 150t/ha. Cette valeur tirée des résultats d'expérimentation tient compte de 30% d'abattement compte tenu des conditions favorables ayant permis d'observer des rendements supérieurs de l'ordre de 220 t/ha.

Le facteur d'émission retenu pour le protoxyde d'azote est pris égal à 1% de l'azote introduit sous forme minérale (engrais chimique).

L'énergie électrique du système n'est renouvelable que dans une certaine mesure étant donné que 15% de l'électricité est produite à partir d'une source fossile (fuel).

Les caractéristiques du PCI renvoient aux propriétés mesurées sur la variété TC8 à 12 mois.

| Définition des paramètres | Scénario de référence 5 MW | Scénario de référence 10 MW |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Gisement (ha) | 506,000 | 1 012,000 |
| rendement (t MF plante entière /ha) | 150,000 | 150,000 |
| Variété | TC8 | TC8 |
| Part de fuel | 15% | 15% |
| Facteur Emission directe N2O | 1% | 1% |

Tableau 14 : Détail des paramètres utilisés dans la construction des 2 scénarios de référence

Résultats bruts et comparatifs des scénarios 5 et 10 MW

L'outil REBECCA-ACV permet, à partir des 7 indicateurs d'intérêt choisis parmi les 20 indicateurs de la méthode Recipe Midpoint, d'établir le profil environnemental des 2 scénarios de référence. Ils sont présentés dans le Tableau 2 accompagnés du profil environnemental du mix électrique établi à partir des données du PRERURE (PRERURE, mai 2008).

| | Scénario de référence 5 MW | Scénario de référence 10 MW | Mix électrique Guadeloupe |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | 1 kWh électrique | 1 kWh électrique | 1 kWh électrique |
| Changement climatique (g CO2 eq) | 289,484 | 291,785 | 710,106 |
| Consommation d'énergie primaire (kWh) | 0,988 | 0,998 | 2,659 |
| oxydation photochimique(kg NMVOC) | 3,056E-03 | 3,085E-03 | 3,581E-03 |
| Acidification terrestre(kg SO2 eq) | 5,320E-03 | 5,339E-03 | 6,049E-03 |
| Eutrophisation eau douce (kg P eq) | 1,293E-04 | 1,287E-04 | 1,592E-04 |
| Eutrophication eau de mer(kg N eq) | 1,746E-04 | 1,755E-04 | 1,998E-04 |
| Compétition territoriale (m²a) | 1,382E-01 | 1,381E-01 | 9,191E-03 |

Tableau 15 : Profil environnemental simplifié (7 indicateurs) des 2 scénarios de référence et du mix électrique Guadeloupe.

La comparaison directe des 2 scénarios 5 et 10 MW est établie en Annexe 2. Chacun des postes contribuant au bilan environnemental y est présenté permettant d'observer certaines différences minimes. En effet, les différences observables entre les deux scénarios sont faibles sur tous les indicateurs, malgré le fait que les distances parcourues pour assurer l'approvisionnement de la centrale 10 MW soient supérieures à celles nécessaires pour assurer le transport dans le scénario 5MWh. Ainsi, l'efficacité du système ramené au kWh électrique produit est très peu influencée par la puissance du système, et le scénario 5 MW semblerait légèrement plus performant.

Les deux scénarios peuvent aussi être comparés au profil du mix électrique Guadeloupéen (Figure 2), moyennant des précautions dans cette analyse étant donné les hypothèses posées pour établir le profil du mix électrique (Merle, 2012). Il est ainsi possible de quantifier les différences en comparant les résultats à ceux obtenus pour une production électrique de substitution qui serait utilisée si la filière n'existait pas.

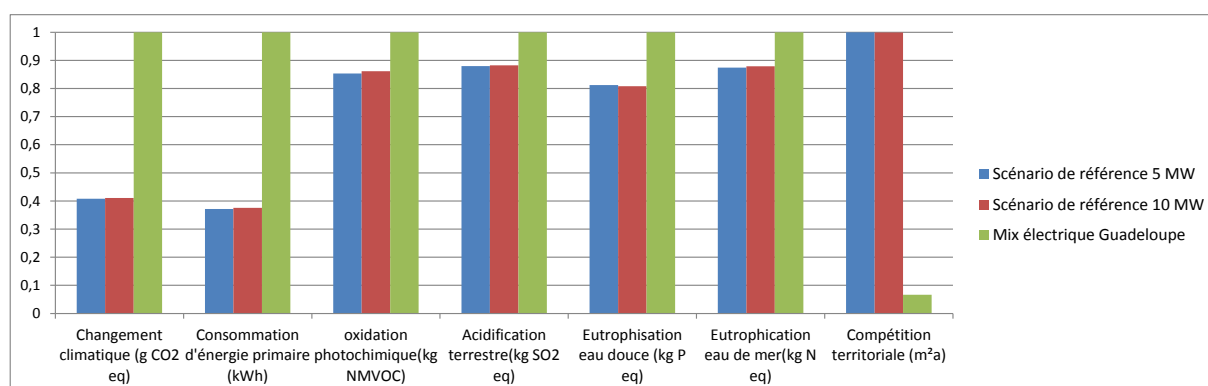


Figure 11 : Comparaison des profils environnementaux des scénarios 5MW, 10MW et du mix électrique Guadeloupe. Chacun des indicateurs choisis présente un maximum établi à 1 et porté par l'une des 3 options évaluée.

La comparaison relative des deux autres options à ce maximum (dont les valeurs absolues apparaissent dans le tableau 2) est ainsi simplifiée.

Ainsi en adoptant le scénario 5 MW ou 10 MW et comparativement au mix électrique actuel, il serait envisageable d'obtenir respectivement :

Un gain sur l'émission d'environ 15 900 t 31625 t équivalent CO₂ chaque année,

Un gain sur la consommation d'environ 63,2 GWh et 125,6 GWh chaque année,

Un gain sur l'émission d'environ 19,8kg et de 3,7 t équivalent Composés Organiques Volatils Non Méthaniques (NMCOV), chaque année,

Un gain sur l'émission d'environ 27.6 t et 53.7 t équivalent SO₂, chaque année,

Une perte sur l'emprise du territoire évaluée à 487.6 ha et 974 ha. En effet, la production électrique d'origine agricole nécessite des surfaces nettement supérieures à celles nécessaires à l'emplacement d'un site industriel présent dans tous les cas. Le cas de l'indicateur « compétition territoriale » révèle donc que le maximum n'est pas toujours porté par le mix électrique Guadeloupe.

Au regard de la productivité du système et non plus de son efficience, le scénario 10 MW permet d'éviter un peu moins double des émissions de GES et autres polluants en comparant avec le mix électrique, moyennant une emprise plus forte sur le territoire. Il faudrait s'assurer néanmoins d'un approvisionnement en biomasse suffisant pour justifier un tel choix.

L'outil REBECCA-ACV permet donc de quantifier des gains ou des pertes espérées en adoptant un scénario plutôt qu'un autre.

3.4.4 Analyses de sensibilité

En partant de la référence 5 MW, il est intéressant de mener une analyse de sensibilité en vue de révéler les paramètres les plus impactant dans le bilan. En multipliant les scénarios, à partir des valeurs minimales et maximales sur les paramètres d'entrée, il est possible de mettre en évidence la sensibilité des résultats à ces paramètres pour lesquels il faudra tendre vers une réduction de l'incertitude. L'outil REBECCA-ACV présente une interface simplifiée permettant de multiplier les scénarios facilitant ce type d'analyse.

En guise d'exemple, 4 paramètres structurants ont été testés : le gisement, le rendement, la part de fuel dans la production électrique et le facteur d'émission directe de N₂O (gaz agricole). Leur analyse se focalise sur 2 des indicateurs les plus robustes pour l'analyse de sensibilité : le changement climatique (**Indicateur 1**) qui établit le bilan des différents gaz à effet de serre, et la consommation d'énergie primaire (**Indicateur 2**). Les variations appliquées sur chacun des paramètres (G, R, F, N) rendent compte de situations contrastées (1 et 3) de part et d'autre du scénario de référence (2). Les tableaux de résultats et les graphiques correspondants sont présentés en Annexe (Merle, 2012, note scient. n°8).

- Analyse sur le gisement

L'incertitude sur le gisement prise par défaut à 30% dépend de paramètres socio-économiques. En effet, l'incertitude sur ce paramètre est difficilement quantifiable, les conditions d'intéressement des producteurs sont essentiellement fonction du prix de la canne. Les résultats de l'analyse des 3 scénarios G1, G2 et G3 montrent l'influence de la variation de 30% de part et d'autre du gisement de base fixé à 506 ha (G2). La diminution de 30% du gisement augmente l'indicateur 1 de 3,4% et l'indicateur 2 de 3,2% environ. La diminution ou l'augmentation du gisement a une répercussion directe sur la quantité de biomasse alternative dans le bilan.

- Analyse sur le rendement

Les résultats de l'analyse des 3 scénarios R1 R2 et R3 estiment des rendements allant de 100 t (R1) à 200 t (R3). Il sera plus probable d'observer des rendements situés au-dessus de 150 t/ha (R2). Une diminution du rendement à 100t/ha, bien qu'improbable, augmenterait de 29 et 28 % respectivement les indicateurs 1 et 2. Une augmentation du rendement à 200t/ha ferait diminuer d'environ 15% les deux indicateurs.

- Analyse sur la part de fuel

Le passage de 15% à 10% de la part de fuel agit sur l'indicateur 1 de 8.9%. En diminuant à 5% la part de fuel, l'indicateur 1 est diminué de 17.8%. L'indicateur 2 est encore plus sensible à ces diminution respectivement de 11 et 23% en passant à 10 et 5% de fuel. Il est à noter que la modification de la part de fuel dans la production électrique agit principalement sur nos deux indicateurs et peu sur les autres. Aussi, une réduction de la part de fuel serait à compenser par un apport supplémentaire en biomasse.

- Analyse sur le facteur d'émission N2O

L'émission de protoxyde d'azote (gaz agricole) est fonction des apports en éléments fertilisants, et du contexte agro-pédo-climatique. Il s'agit d'un puissant gaz à effet de serre d'origine agricole. Les résultats de l'analyse des 3 scénarios N1 N2 et N3 ne montrent ainsi de variations significatives que sur l'indicateur 1 ; une variation de ± 50 % du facteur d'émission directe de protoxyde d'azote, fait varier l'indicateur 1 à hauteur de 4.6% environ.

3.4.5 Autres fonctionnalités de l'outil

L'outil REBCCA-ACV permet de modifier les limites du système considéré en offrant le choix sur la prise en compte des éléments suivants :

- le changement d'affectation des sols lié au passage d'une prairie permanente à une mise en culture. (non pris en compte dans cette synthèse)
- la part des matériaux agricoles, exclue dans le cadre comparatif avec le mix électrique guadeloupéen. L'exclusion du machinisme permet de ne pas pénaliser par défaut la filière agricole comparativement à une filière fossile, dont on ne connaît pas le niveau d'information qui a été pris en compte dans la réalisation de son bilan. (Pris en compte dans notre étude)
- la part de l'infrastructure industrielle (Pris en compte dans notre étude)
- l'épandage des cendres obtenues par la combustion de la biomasse (Non pris en compte dans notre étude)

L'outil permet d'évaluer 20 indicateurs environnementaux différents. L'étude s'est attachée dans un premier temps à n'en analyser qu'une partie figurant parmi les plus robustes. Il est ainsi envisageable de regarder en fonction des paramètres posés d'éventuels transferts de pollution d'un scénario à l'autre. A partir des choix variétaux, du gisement et du rendement, REBECCA-ACV propose un dimensionnement théorique d'une centrale approvisionnée uniquement avec de la canne fibre. Inversement, à partir des objectifs de puissance et de la part de fuel dans la production électrique, l'outil estime le complément en biomasse nécessaire à son approvisionnement. (Merle 2012, annexe note scient n° 8).

L'outil permet de modifier le mix électrique Guadeloupéen (part de l'énergie fossile, bagasse, géothermie, solaire, éolien) permettant de créer des hypothèses sur la source d'énergie qui ne

serait pas utilisée si l'unité canne combustible était en activité. Cette fonctionnalité permet de mettre à jour les données sur le mix, de comparer les résultats obtenus à ceux estimés pour le mix électrique Guadeloupéen et ainsi d'envisager les gains ou pertes par indicateurs.

Enfin, différentes sorties graphiques permettent d'analyser le profil environnemental et de connaître les postes les plus impactant par type d'indicateur. Aussi des sorties graphique permettent de distinguer la part relative de chacun des volets de la filière ou encore d'effectuer un zoom sur la partie agricole ou industrielle à l'aide de graphiques prédéfinis (Merle 2012).

3.4.6 Conclusions partielles Perspectives

Les résultats présentés dans cette synthèse offrent une visibilité sur les tendances d'évolution du bilan environnemental en fonction des choix effectués sur les paramètres clé de description de la filière canne combustible. La quantification des gains observés relativement à la filière électrique existante sont par exemple des ordres de grandeurs mais ne peuvent s'avérer être prédictif d'une situation future. Le bilan environnemental est construit à partir de nombreuses hypothèses et de nombreux paramètres nécessiteraient d'être contextualisés. Des voies d'amélioration sont possibles, notamment sur la qualité des données :

Acquérir des connaissances plus précises en ACV pour la Guadeloupe : Un effort a été mené rendre compte de l'insularité en considérant la provenance des ressources consommées. Une meilleure connaissance des profils environnementaux sur les processus guadeloupéen permettrait de gagner en précision. Par exemple, la référence au mix électrique est un point important de l'analyse comparative et mériterait une attention particulière dans l'élaboration. Il serait intéressant d'utiliser des processus existants adaptés à la Guadeloupe.

Limitier l'incertitude sur les paramètres structurants : En étoffant la base de données des nouveaux résultats d'expérimentation agronomiques, les paramètres structurants de la filière gagneront en précision (rendement variétal, PCI, ...)

Améliorer la connaissance du devenir des éléments dans les sols :

Une meilleure connaissance du contexte agro pédo climatique, mis en relation avec des pratiques culturales (interventions raisonnées) permettrait d'affiner certains facteurs d'émission au champ. Certaines expérimentations nécessiteraient d'être menées spécifiquement sur canne, notamment concernant le devenir de l'azote dans les andosols.

L'interaction du sol avec les résidus de culture, sur l'érosion et le stockage du carbone dans les sols permettra d'affiner le bilan de gaz à effet de serre. En effet, une meilleure prise en compte du stockage et du déstockage du carbone dans les andosols, notamment au travers du changement d'affectation des sols, pourrait être l'un des points d'amélioration prioritaire.

Etablir un bilan environnemental précis d'une biomasse additionnelle en provenance de la filière sucre : Par défaut, ce complément en biomasse est calculé avec les propriétés connues de la canne étudiée. L'impact environnemental correspondant est légèrement supérieur à celui calculé pour la canne du fait de la prise en compte d'une distance de transport supérieure rendant compte d'un gisement a priori plus épars.

Finalement, l'outil REBECCA-ACV pourra être un outil d'aide à la décision en vue d'élaborer et d'optimiser une nouvelle filière de production agricole à des fins industrielles. En effet, en modifiant les paramètres du système, à partir des choix d'itinéraire cultural, d'emplacement de la centrale ou encore de puissance de l'unité industrielle, l'étude de l'optimisation du système pourra être faite. L'outil offre donc des perspectives dans l'aide à la décision sur les choix à effectuer. Les résultats environnementaux obtenus sont à interpréter avec précaution et doivent être mis en balance avec les indicateurs agronomiques et économiques afin de proposer des choix optimisés en fonction des priorités, des besoins, des contraintes, des réglementations etc ...

4. ACTIVITÉS DU CHEF DE PROGRAMME

Jean-Louis Chopart

4.1 Activités managériales

Aménagements des bâtiments installations des équipements

Pour permettre une production scientifique, il a d'abord fallu construire le cadre de travail, mettre en route les équipements scientifiques et recruter le personnel. Le programme REBECCA était localisé dans une exploitation agricole, en dehors de toute structure de recherche. Il a fallu, au cours de la première phase du programme en 2010, avoir des activités de logistique pour que le bâtiment, en travaux de réhabilitation, soit au plus vite opérationnel (photos 22, 23, 24)



Photos 22, 23 et 24. Evolution du local REBECCA sur l'exploitation agricole du Fromager, depuis le début du programme; à gauche état initial fin mai 2010, au milieu en octobre 2010, à droite état depuis décembre 2010.

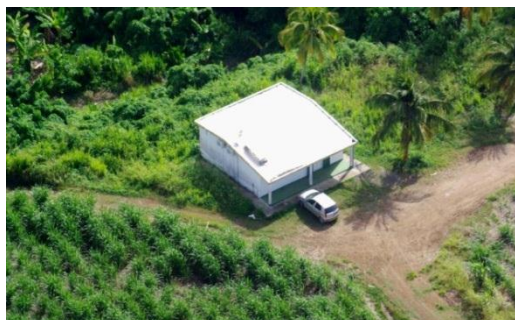


Photo 25 Vue aérienne du local de recherche du programme REBECCA (1 juin 2012)

Recrutement formation, encadrement de 2 techniciens et d'une assistante de gestion

J'ai ensuite recruté deux techniciens (Patrice Jacquet et Bernard Marseille) et une assistante de gestion (Chantal Catho) suivant des procédures d'évaluation permettant une stricte objectivité des choix. J'ai formé les techniciens aux méthodes de l'expérimentation agronomique sur le terrain, à la gestion des données et au maniement des équipements scientifiques, dont le SPIR.



Photo 26. Séance de tests écrits dans le cadre du recrutement du premier technicien en février 2011 (huit candidats)

4.2 Activités scientifiques

Production scientifique

Au cours de cette première phase du programme mes activités de chef de programme ont d'abord consisté en des tâches scientifiques dont le rapport final est l'un des principaux résultats. Cette activité scientifique peut aussi être évaluée par sa production scientifique en relation directe avec le programme. J'ai ainsi rédigé 7 notes scientifiques :

- *Chopart JL 2011 Premières estimations de production de 6 variétés de cannes à vocation énergie sur des parcelles test au Fromager (Basse-Terre note scient n°1 5p*
- *Chopart JL, Juin 2011. Point sur les activités et études réalisées entre le 1^{er} avril et le 7 juin et programmées en phase 1. Note scientifique n° 2.*
- *Auzoux S, Chopart JL, De Saint-Seine G., Septembre 2011. REBECCA-BD.A (V1.0), base de données agronomiques du programme REBECCA : présentation et guide de l'utilisateur. Note scientifique n°3.*
- *Chopart JL 2012 Rapport d'exécution de la première année du programme REBECCA, de mai 2010 à mai 2011. Activités, premiers résultats et indicateurs note scient n° 4 15p.*
- *Chopart 2012 Activités et études réalisées entre le 20 septembre 2011 et le 31 janvier 2012. Volet agro-variétal, Calibration SPIR et qualité de la biomasse, Chlordécone dans le système sol plante Note scientifique n°5 12 p*
- *Chopart JL, Marie P. 2012. Estimation de la biomasse résiduelle potentiellement disponible après une culture de canne à usage de combustible dans le Sud de la Guadeloupe. Note scient n° 9, 15 p.*
- *Marie P, Chopart JL 2012. Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines de cinq variétés de canne à sucre dans un sol volcanique pollué de Guadeloupe. Note scient n° 10, 17 p.*
- *Marie P, Chopart JL 2012. Il n'y a pas de chlordécone dans des cendres issues de la combustion en chaudière industrielle de la bagasse de canne à sucre cultivée sur un sol contaminé. Note scient n° 11, 4 p.*

J'ai aussi soumis les résumés de 4 communications dans deux congrès scientifiques qui vont avoir lieu en septembre 2012 (Réunion Congrès ARTAS-AFCAS)

Congrès ARTAS

- *Chopart JL, Bachelier B. Propriétés et performances comparées de 16 cultivars de Poacées (Saccharum sp. et Erianthus) en vue d'un usage énergétique.*
- *Lejars C, Fusillier JL, Blazy JM, Guindé L, Merle T, Chopart JL, Guichard R. Une filière canne dédiée à la production électrique peut-elle avoir un intérêt économique et environnemental ? Méthodes et premiers éléments d'analyse en Guadeloupe.*

Congrès ISSCT

- *Auzoux S, Chopart JL, Jacquet P. REBECCA-DB.A: A database for managing data through a research project on energy cane*
- *Chopart JL, Bonnal L, Martiné JF, Sabatier D. Functional relationships between the dry above-ground biomass and the low heating value of sugarcane*

Encadrement formation de stagiaires et d'un CDD

En deux ans, j'ai encadré trois stagiaires

- Geraud de Saint Seine, élève ingénieur agronome, six mois entre janvier et juin 2011. Il a contribué à bâtir le système de traçabilité des échantillons végétaux servant à caractériser la biomasse, depuis le champ jusqu'à la base de données en passant par les analyses SPIR.

- Maurice Bilonière, élève de Master 2 en économie à l'UAG ; cinq mois entre mars et fin juillet 2011. Il a été principalement encadré par moi, et par un enseignant de l'UAG ; il a initié les études agro-économiques. Le titre de son mémoire était « Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Eléments économiques : état des lieux et marges à générer pour rendre la spéculation attrayante pour l'agriculteur ». Le jury de l'UAG lui attribué une excellente note.

- Pauline Marie, élève ingénieur agricole, six mois entre février et juillet 2012 dont le sujet de stage est relatif à la problématique Chlordécone dans le programme, depuis le sol jusqu'aux produits de combustion.

J'ai aussi encadré et contribué à former, au contexte local et au programme, un ingénieur CDD venu 6 mois entre décembre 2011 et mai 2012, spécialisé en analyse ACV.



Photo 27. Séance de travail dans les locaux REBECCA. De gauche à droite : Thomas Merle, ingénieur CDD spécialiste des analyses de cycle de vie (ACV), Jean-Louis Chopart, chef de programme, Pauline Marie, stagiaire ingénieur, Frantz Imanbakas, ingénieur agricole à mi-temps, Bernard Marseille, technicien supérieur agricole



Photo 28 Stagiaire sur le terrain

4.3 Activité d'information auprès du CODIR et du COPIL

En deux ans, il y a eu 4 COPIL et 7 CODIR qui ont donné lieu, à chaque fois, à des documents, sous forme de diaporamas ou écrits. Entre ces réunions, le partenaire industriel a demandé à être tenu informé à un pas de temps mensuel. Le chef de programme a donc dû préparer une courte note mensuelle qu'il a nommé Flash-Infos. Huit Flash-Infos sont ainsi sortis en 2 ans.

Enfin, deux rapports intermédiaires d'exécution scientifiques et financiers ont été remis avant le rapport final. Le premier portait sur la période de mai 2010 à mai 2011, le second portait sur la période de juin 2011 à fin janvier 2012.

Donc, au total, en 24 mois, 21 documents d'information ont été préparés par le chef de programme pour assurer le reporting de ses activités, soit environ un par mois. Cela va en concurrence avec les activités de terrain et avec la réflexion et la production scientifique.

4.4 Information extérieure auprès des décideurs et du public

Au cours des 2 ans du programme, j'ai à de nombreuses occasions, présenté le programme REBECCA à un public extérieur au monde de la recherche et aux membres du COPIL. Les huit actions formelles rappelées ci-dessous ne sont pas limitatives, elles ne prennent pas en compte plusieurs visiteurs et réunions (dont une organisée par la DRRT fin mai 2011)

Canne et chlordecone : le remède électrique

Produire de l'électricité à partir de cannes cultivées sur les terres polluées par la chlordécone, c'est le projet Cann'Elec.

Imaginez 4 000 hectares plantés de cannes dans le sud Basse-Terre, produisant toute l'année avec un rendement de 200, voire 220 tonnes par hectare. Rêve d'ivrogne ou d'amateur de sucre ? Non, projet agro-énergétique en cours de concrétisation.

L'idée est lumineuse : elle consiste à utiliser les terres polluées pour des décennies par la chlordécone – 3 500 à 4 000 hectares en Basse-Terre – pour y cultiver une variété spécifique de canne, simplement destinée à être brûlée dans des chaudières afin de produire de l'énergie. Le projet est porté par une SARL, Cann'Elec, et par le Cirad (➡) pour la partie recherche et développement. La Sara est intéressée pour le mettre en œuvre, tandis qu'EDF est prête à assurer la distribution de l'électricité produite.

Le stade de l'idée est dépassé. « La recherche de nouvelles variétés de cannes a été lancée depuis plus de deux ans, confie Jean-Louis Chopart (Cirad). Nous avons trouvé des variétés riches en fibres, originaires de Barbade, qui viennent d'achever leurs deux ans de quarantaine au Cirad de Montpellier. » Introduites voici quelques semaines en Guadeloupe, elles font l'objet actuellement d'une culture expérimentale sur



Roland Guichard (Cann'Elec, à gauche) et Jean-Louis Chopart (Cirad). L'idée du projet est née alors que Roland Guichard étudiait pour la distillerie Bologne, un concept de production d'électricité à partir de chaudières à bagasse. (PHOTOS : ROBERTO BIRHUIS)

une parcelle d'un hectare à Fromager (Capesterre-Belle-Eau).

Les fumées au microscope

Les intérêts de cette idée sont multiples. Outre que les trois centrales en projet produiront chacune 10 mégawatts, sans brûler d'énergie fossile, elles constitueront également l'outil essentiel d'une filière d'élimination des déchets bois, carton, papier, palettes, élagage...

Plus important encore, des centaines d'agriculteurs retrouveront une activité qui, compte tenu de la forte productivité

des variétés choisies et d'une production étalée sur toute l'année, s'avérera au moins aussi rentable que l'actuelle culture de canne à sucre. À terme, il peut s'agir d'une garantie de pérennité pour la filière canne. Enfin, ce projet expérimenté en Guadeloupe pourra, plus tard, être exporté dans tous les systèmes insulaires tropicaux.

Dans sept ans, la première centrale pourrait être opérationnelle, à condition que... Une seule condition, mais essentielle : il faut que les cannes produites ne contiennent pas trop de chlordécone. Si elles en contiennent, les unités de combustion ne pourront pas fonctionner sans capteurs spéciaux des fumées, et ces équipements sont très chers. Le projet ne sera plus économiquement viable. D'où ce laps de temps de sept ans que se sont donné les concepteurs, dont quatre ans pour effectuer toutes les études nécessaires. Les premiers éléments rassemblés par l'Inra semblent rassurants : la molécule « monterait très peu dans la plante ». M. A. ■

➡ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour



Comme ont pu le constater les différents acteurs du projet, celui-ci suit son cours puisque la variété de cannes sélectionnée est déjà cultivée de façon expérimentale sur une parcelle d'un hectare à Fromager.

Conférence de presse (avec M R Guichard fin mai 2010 Dès le tout début du projet avec restitution dans le journal France-Antilles (voir la coupure de journal ci-dessus

- 2 exposés auprès des membres du pôle de compétitivité Synergile, fin mai 2012 et novembre 2010.

- Présentation, à la Région Guadeloupe, devant des décideurs de la Région Guadeloupe et des visiteurs des régions RUP Martinique Réunion, Guyane, le 11 novembre 2010

- Présentation à un responsable parisien du Ministère de l'Agriculture, M Menard, en présence d'un responsable de la DAAF Guadeloupe, le 30 juillet 2011

- Présentation (avec M R Guichard) aux décideurs de la Guadeloupe le 21 novembre 2011 matin

- Présentation (avec M R Guichard) aux acteurs potentiels de la future filière canne à usage combustible le 21 novembre 2011 après midi

- Présentation aux responsables de la filière canne à sucre à l'île Maurice (STASM) en décembre 2011, lors d'une mission (non financée par le programme).

Proposition d'un nouveau nom pour le programme de recherche : programme cann'elec à programme REBECCA

Lors du COPIL du 24 février 2011, il été jugé souhaitable par les membres du COPIL, de modifier le nom du programme Cann'elec. Ce programme de recherche, focalisé sur le Sud Basse-Terre portait en effet le même nom que celui du partenaire «Cann'elec Développement » qui a déposé, sous son nom l'appellation « Cann'elec ». Or, ce partenaire élabore en son nom propre des projets extérieurs au présent programme de recherche. Lors d'un CODIR du programme (regroupant les 2 partenaires Cann'elec Développement et CIRAD), le 1 avril 2011, le principe du changement de nom a été acquis. J'ai proposé plusieurs nouveaux acronymes. Celui retenu en CODIR du 9 juin 2011 est : « REBECCA ». J'ai porté ce changement de nom à la connaissance de la DRRT et de la cellule Europe de la Préfecture le 17 juin 2011. Le nouveau nom est plus explicite sur le contenu et la localisation du programme (REBECCA : Recherche Biomasse Energie Canne à Capesterre). J'ai aussi élaboré le nouveau logo, dans le cadre de mes fonctions, donc sans incidence financière pour le programme.



CONCLUSION PERSPECTIVES

La première conclusion est que, comme prévu initialement, il n'est pas possible de produire, en fin de phase 1, après seulement deux ans de recherches, une conclusion définitive sur l'intérêt et la faisabilité en Sud Basse-Terre d'une nouvelle filière produisant de l'électricité à partir de la biomasse de la canne à sucre cultivée spécifiquement à cet usage. En effet, le sujet est nouveau, la culture de la canne a un cycle long d'un an (renouvelable), et les scénarios du possible sont nombreux.

Des résultats très encourageants ont néanmoins été obtenus en phase 1 dans chacun des trois principaux volets (agro-variétal, chlordécone dans la plante et lors de la combustion, économie-environnement). Ces résultats, pour la plupart provisoires, sont décrits dans le résumé. Ils ne seront donc pas répétés ici.

On se contentera de mettre l'accent sur ceux qui peuvent, dès maintenant, être considérés comme des résultats définitifs ou au moins très consolidés, ou au contraire sur les résultats de la phase 1 pouvant éventuellement entraîner des interrogations, voire des limitations à la faisabilité de la filière.

-A/ Les résultats pouvant dès maintenant être considérés comme définitifs ou susceptibles de n'évoluer qu'à la marge sont :

1) Des outils : (i) la caractérisation, adaptée aux biomasses étudiées, des taux de fibres et du pouvoir calorifique de cette biomasse avec la méthodologie SPIR, (ii) une base de données (REBECCA-BD.A) stockant, gérant et pouvant mettre en relation les données agronomiques et de qualité de la biomasse, (iii) un outil permettant l'analyse environnementale de la nouvelle filière (REBECCA-AVC), (iv) des outils de type économiques permettant l'estimation du gisement potentiellement disponible (GIZCAN) et de la rentabilité économique de la filière,

- **2) des dispositifs expérimentaux**, variétaux et agronomiques pluriannuels testant les variétés et les pratiques culturales,

- **3) des parcelles de multiplication** des meilleures variétés pour anticiper les travaux de la phase 2, et le changement d'échelle,

- **4) un modèle simple**, donc opérationnel en phase de développement, permettant d'estimer le pouvoir calorifique de la biomasse sèche de la plante entière à partir de son simple poids,

- **5) des résultats scientifiques** portant sur : (i) le gisement potentiellement disponible dans la zone de Capesterre en fonction du prix qui sera proposé à l'agriculteur, (ii) la teneur (faible) en chlordécone dans les parties de la plante qui seront utilisées comme combustible et le fait que cette chlordécone est décomposée à des températures nettement inférieures à celles atteintes lors de la combustion industrielle.

-B/Eléments apparus en cours de phase 1 et non résolus

Concernant les éléments apparus en cours, voire en fin de phase 1, il y a le problème d'une insuffisante disponibilité en biomasse combustible dans le bassin de production de Sud Basse-Terre, si l'on ne considère que (ou très majoritairement) la canne à sucre, comme prévu dans le projet initial. Ceci compte tenu des hypothèses retenues en cours de phase 1, comme viables pour le prix attendu du KWH.

Sans entrer dans le détail de ce débat, si l'on considère un gisement potentiel d'environ 500 ha (résultats de l'INRA) et une production de biomasse combustible de 150 t/ha/an de matière fraîche totale (estimation très prudente), il y aurait donc une production d'environ 75000 t/an de canne combustible. D'après les données disponibles en début de programme (document de demande de financement), 500 ha étaient suffisants pour alimenter une centrale de 5 MW. Les calculs récents (et prudents) du partenaire industriel font état, pour une centrale de 5MW, d'un besoin de 46 000 tonnes de matière sèche de biomasse, soit environ 136 000 tonnes de matière fraîche à 32 % de MS.

Ces estimations aboutissent à une insuffisance de biomasse pour rendre rentable, donc viable, la nouvelle filière, s'il n'y a pas un complément très conséquent de biomasse exogène au système de production de canne combustible. Les calculs de rentabilité ont été faits avec des hypothèses très prudentes de rendements (150 t/ha/an de biomasse humide, mesurée bord champ, comprenant les tiges usinables, les parties sommitales des tiges et toutes les feuilles restées attachées aux tiges).

Nos premiers résultats, disponibles en fin de phase 1, aboutissent à des chiffres plus élevés, environ 220-230 t/ha/an. Ils sont supérieurs à ceux annoncés dans le document-projet à N+2. Il faut, pour extrapoler aux conditions de production des agriculteurs, appliquer un coefficient d'abattement. Mais, le travail de la recherche agronomique en phase 2 sera, entre autre, de limiter cet écart. Si l'on peut ainsi espérer, avec les variétés actuelles et de bonnes pratiques culturales, un rendement de 180 t/ha de matière fraîche totale, on arrive à un total de 90000 tonnes/an. Par ailleurs, les meilleures variétés actuelles (commandées au WICSBS par les initiateurs du projet en 2008) sont, en fait, des cannes mixtes (*multipurpose*). Lors d'une mission récente au WICSBS à la Barbade, on a eu connaissance de variétés plus performantes encore, du point de vue de la teneur en fibres et sans doute du rendement en tonnage comme en énergie. Ces variétés, si elles sont commandées en début de phase 2, pourraient être disponibles dans trois ans, donc avant le début de la mise en route de la filière. Leur utilisation, avec des rendements améliorés de 20% environ, par exemple, conduirait à augmenter le volume de canne combustible pour s'approcher des 130.000 tonnes/an dédiées à la combustion, ce qui est déjà considérable.

Cela n'empêche pas de réfléchir, en phase 2, à la disponibilité de biomasses additionnelles. Elles seraient alors considérées comme des compléments, et pour l'étude, de variable d'ajustement. On devra respecter scrupuleusement les principes de précaution concernant le maintien de la fertilité du sol. On pourrait aussi envisager l'utilisation de déchets agricoles, ou toute autre source de biomasse telles qu'étudiées par la DAAF 971 (Mario Charrière).

Par ailleurs, il y a peut-être des pistes pour s'adapter à une configuration où, dans le sud Basse-Terre, on ne pourra pas dépasser 500 à 600 ha consacrés à la canne fibre. Pourquoi, par exemple, ne pas accepter un taux de rentabilité interne de l'industriel inférieur à celui actuellement recherché (11%, garanti sur 25 ans)? Pourquoi ne pas chiffrer d'autres services environnementaux que la canne fibre pourrait apporter ?

Si, avec les paramètres actuels de la Guadeloupe (économique, disponibilité en terre, prix de la main-d'œuvre, exigence de taux de rentabilité interne élevé), il s'avérait que ce type de filière n'est finalement pas faisable à court terme, ce n'est pas pour autant qu'un projet de très petite centrale électrique de 3 à 5MW utilisant la canne à sucre ne serait pas rentable et utile à la population dans d'autres îles de l'arc Antillais, soumises à d'autres contraintes ou jeux d'hypothèses. Il y aurait là matière à une belle coopération régionale scientifique et économique à partir d'un savoir-faire Guadeloupéen.

Enfin, il est probable que, la technologie avançant vite dans ce domaine, d'autres voies plus sophistiquées et performantes que la simple combustion ou la fabrication d'éthanol par distillation voient le jour (chimie verte, gazéification évoluée, etc.). Ces filières auront forcément besoin, pour percer, d'une biomasse issue d'une plante performante comme la canne à sucre et, au même endroit, d'un environnement scientifique favorable. La Guadeloupe dispose des deux.

Ces différents éléments montrent que, si rien n'est gagné en fin de phase 1, tout reste possible en phase 2 et après. Les premiers résultats et outils obtenus en phase 1 sont une source d'encouragement à poursuivre et à intensifier les études sur la canne fibre énergie en phase 2.

Au cours de cette phase, l'apport de nouveaux résultats agronomiques, économiques, environnementaux et industriels permettront d'évaluer, de façon cette fois consistante, la faisabilité et l'intérêt de cette nouvelle filière. Avec un optimisme réaliste, ils devraient permettre d'améliorer la visibilité sur la faisabilité de cette nouvelle source d'énergie et sur les revenus des agriculteurs, de façon durable et éthique, sans créer de conflits entre filières et usages des terres et en respectant le patrimoine sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographiques portant sur le volet 1 Agro variétal

Auzoux S, Chopart JL, De Saint-Seine G., Septembre 2011. REBECCA-BD.A (V1.0), base de données agronomiques du programme REBECCA : présentation et guide de l'utilisateur. Note scientifique n°3.

Azevedo M.C.B., Chopart J.L., Medina de Conti C. 2011. Sugarcane root length density and distribution from root intersection counting on a trench-profile. Sci. Agric., v.68, 1, 94-101.

Cabidoche YM, Achard R, Clermont-Dauphin C, Massat F, Sansoulet J 2009. Long term pollution by Chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple model accounts for current residue Env. Pollution 157 1697-1705.

Chopart JL, Marion D, 1994. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire note scient. CIRAD/IDESSA n° 7/94, 28 p.

Chopart J.L. 1999. Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal : outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé. France. Thèse Univ. J. Fourier Grenoble, 350 p.

Chopart JL 2004. Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude *in situ*, développement, fonctionnement. Document de synthèse note Cirad 43p.

Chopart, J.L., Le Mézo L., Brossier J.L. 2009 Spatial 2D distribution and depth of sugarcane root system in a deep soil. Communication Congrès ISSR (Int. Soc. of Root Research) ROOTRAP (Root Research and Applications). Sept. 2-4 Vienna (Autriche). 4 p

Chopart J.L., Azevedo M.C.B., Le Mézo L., Marion D. 2010. Functional relationships between sugarcane root biomass and length for cropping system applications. Sugar Tech. 2 12:317–321

Chopart JL 2012a. Rapport d'exécution de la première année du programme REBECCA, de mai 2010 à mai 2011. Activités, premiers résultats et indicateurs. Note scientifique n°4. 15 p.

Chopart JL 2012b. Résultats du programme REBECCA phase 1 de septembre 2011 à mars 2012. Volet agro-variétal. Note scientifique CIRAD REBECCA N°6, avril 2012

Chabrier .2006 Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. Rapport final d'exécution 100 p.

Dorel. M, Roger Estrade. J. 1998 Porosité et propriétés hydriques des sols volcaniques de la Guadeloupe Rôle des constituants du sol. Congrès mondial de science du sol. 7p.

Ercane 2010. Catalogue des variétés. Revue Canne Progrès n°22 8 p.

Evensen CI, Muchow RC, El-Swaify SA, Osgood RV, 1997. Yield accumulation in sugarcane. I Effect of crop age and cultivar. Agron J. 89 638-646

Van Dillewijn, C. 1952. Botany of Sugarcane. Chronica Botanica Co. Waltham, MA, 371 pp.

Chabrier. 2006 Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. Rapport final d'exécution 100 p.

Dorel. M, Roger Estrade. J., 1998 Porosité et propriétés hydriques des sols volcaniques de la Guadeloupe Rôle des constituants du sol. Congrès mondial de science du sol. 7p.

eRcane 2010. Catalogue des variétés. Revue Canne Progrès n°22 8 p.

Evensen CI, Muchow RC, El-Swaify SA, Osgood RV, 1997. Yield accumulation in sugarcane. I Effect of crop age and cultivar. Agron J. 89 638-646

Van Dillewijn, C. 1952. Botany of Sugarcane. Chronica Botanica Co. Waltham, MA, 371 pp.

Référence bibliographiques portant sur le volet 2 Chlordécone

Cabidoche YM, Desfontaines L, Palmier C 2001. Analyse de l'intérêt agronomique et des conditions d'innocuité pour les sols des cendres de bagasse produites par la centrale du Moule (Guadeloupe). Note INRA Centre Antilles Guyane 23p.

Cabidoche YM, Achard R, Cattan P, Clermont-Daupin C, Massat F, Sansoulet J 2009. Long-term pollution by chlordane of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residues. Environmental Pollution, 157, 1697-1705.

Cabidoche YM, Lesueur Jannoyer M 2011. Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? Innovations Agronomiques 16 (2011), 117-133.

Cabidoche YM, Laurent F, Lesueur-Jannoyer M 2012. Les déterminants de la contamination des plantes par la chlordécone (WP PLANT). 15 pages. In : Pollution des sols et des eaux par la chlordécone aux Antilles, conséquences sur la contamination des cultures et des organismes d'écotoxicologie. Compte rendu de fin de projet ANR Chlordexco.

Chabalier PF, Babamoussa I. 1999. Etude de la valeur agronomique des cendres de bagasses de la centrale thermique du Gol. Note CIRAD CA GEC Réunion.16p.

Chopart JL 1999. Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal : outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé. France. Thèse Univ. J. Fourier Grenoble, 350 p.

Chopart JL 2004. Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude *in situ*, développement, fonctionnement. Document de synthèse note Cirad 43p.

Chopart JL, 2012. Résultats du programme REBECCA phase de septembre 2011 à mars 2012. Volet agro-variétal. CIRAD Guadeloupe, note scientifique REBECCA n° 6. 32p.

Clostre F, Lesueur-Jannoyer M 2012. Transfert de la chlordécone du sol vers les produits cultivés. Document de synthèse Cirad : 19 p.

Lesueur-Jannoyer M, Carles C, Michel S 2011. Contamination de la canne à sucre et des sous-produits par la chlordécone. Note PRAM, CIRAD Martinique, 15 p

Marie P, Chopart JL 2012. Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines de cinq variétés de canne à sucre dans un sol volcanique pollué de Guadeloupe. Note scient REBECCA n° 10 17 p.

Marie P, Chopart JL 2012b. Il n'y a pas de chlordécone dans des cendres issues de la combustion en chaudière industrielle de la bagasse de canne à sucre cultivée sur un sol contaminé Note scientifique REBECCA n° 11, juillet 2012, 4p.

Référence bibliographiques portant sur le volet 3 Economie environnement

ABADI GHADIM, A.K., PANNELL, D.J., 1999. A Conceptual Framework of Adoption of an Agricultural Innovation. *Agricultural Economics* 21, 145-154.

AGRIGUA, *Données parcellaires géo référencées de Guadeloupe*. 2004 à 2010.

BAMIERE, L. ; BUREAU, J.C. ; GUNIDE, L. ; GUYOMARD, H. ; JACQUET, F. ; TREGUER, D. (2007). Prospects for EU biofuel production and trade. Quelles perspectives pour la production et le commerce des biocarburants de l'Union européenne ? Grignon: UMR INRA–AgroParisTech Economie publique. 37 p. (Working paper Tradeag; 07/12)

BILIONIERE M., Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Mémoire de master de l'Université des Antilles Guyane, 2011, 81p.

BLAZY J-M, CAUSERET F., DIMAN J-L., 2011a. Conditions d'adoption de plantes de services agroécologiques en rotation avec la banane aux Antilles. Communication orale et Proceedings du 48^{ème} colloque de l'ASRDLF, Schoelcher, Martinique, 6-8 juillet 2011, 18p.

BLAZY J-M, CARPENTIER, A., THOMAS, A., 2011. The willingness to adopt agro-ecological innovations: Application of choice modelling to Caribbean banana planters. *Ecological Economics* 72, 140-150.

BLAZY J-M, 2011. Innovation and adoption of sustainable crop management systems in the banana sector. *Innovations Agronomiques* 16, 25-37.

BLAZY J-M, OZIER-LAFONTAINE, H., DORE, T., THOMAS, A., WERY, J., 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agricultural Systems* 101, 30-41.

Blazy, J-M, Causeret, F., Chopin, P., Diman, J-L., Guindé, L., 2012. *"Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de biomasse issue de*

cannes fibres à Capesterre-Belle-eau, Guadeloupe". Rapport final d'exécution de l'Assistance technique INRA (UR ASTRO) dans le cadre du projet REBECCA, 55 pages.

BOCQUENE, G., FRANCO ? A., 2005. Pesticide Contamination of the Coastline of Martinique. *Marine Pollution Bulletin* 51, 612-619.

BONAN H., PRIME, J.L., 2001. Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

BONIN, M., CATTAN, P., 2006. Convergences and Differences between the Objectives of the Financial Support Facilities and those of the Farmers: The Case of Fallow Periods in Banana Production of Guadeloupe. *Fruits* 61, 9–23.

BUREAU, J.C. ; GOHIN, A. ; GUNIDE, L. ; MILLET, G. (2007). EU sugar reforms and their impacts. Les réformes de l'OCM sucre de l'Union européenne et leurs impacts. Colloque de l'IFPRI "Global Sugar Markets, Policies and Reform Options" ; 01/06; Washington (USA). 36 p.

CABIDOCHÉ, Y.-M., ACHARD R., CATTAN P., CLERMONT-DAUPHIN, C., MASSAT, F., SANSOULET, J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution* 157, 1697-1705.

Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe, *Référentiel Technico Economique*. 2007, 77p.

Chambre d'Agriculture de la Guadeloupe, *Prix des intrants agricoles 2009*. Edition 2010.

CHOPART J.L., Résultats du programme REBECCA phase 1 de septembre 2011 à mars 2012, Note Scientifique. Avril 2012

CHOPART J.L., Flash-Info n°3 à n°7, Points forts du programme *REBECCA*. 2011, 2012.

CHOPART J.L., Compte-rendu de la réunion du comité de pilotage Cann'elec. 22/12/2010, 29/09/2011 et 24/02/2011.

CHOPART J.L., Présentation du programme REBECCA, Comité de pilotage n°3. 29 septembre 2011.

Chopart J.L. 2012. Résultats du programme REBECCA Phase 1 de septembre 2011 à mars 2012. Volet agro-variétal, modèle d'estimation de la qualité de la biomasse par des mesures SPIR, chlordécone dans le système sol-plante. Note scientifique n°6 Programme REBECCA Cirad Guadeloupe, 33 p.

Chopart J.L, Bachelier B. 2012. Propriétés et performances comparées de 16 cultivars de Poacées (*Saccharum sp.* et *Erianthus*) en vue d'un usage énergétique. Soumis pour communication au congrès AFCAS Réunion, septembre 2012. Document provisoire

DE BARROS, I., BLAZY J-M, RODRIGUES, G.S., TOURNEBIZE, R., CINNA, J.P., 2009. Emergy evaluation and economic performance of banana cropping systems in Guadeloupe (French West Indies). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129, 437-449.

DAAF – Agreste, Recensements agricoles. 2000, 2010.

Frischknecht, 2007. EcoInvent Database: Swiss centre for life cycle Inventories in Ecoinvent centre.

Goedkoop, 2009. Recipe Methodology , A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level, first edition, Ruimte en Milieu.

GUINDE, L., JACQUET, F., MILLET, G. (2008). Impacts du développement des biocarburants sur la production française de grandes cultures. Impacts of the French bio-fuel policy on the French arable crop sub-sector. in : *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement*, vol. 89, n° 4. pp. 55-81.

INRA, Données Agricoles d'enquêtes, Projet MICA. 2000-2008

JOLLIET, 2010. Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan. Presses Polytechniques et universitaires romandes.

LEJARS C., POUZET D., Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe. Projet de recherche ODEADOM, 2008. Partie I : Situation initiale, 64 pages.

LEJARS C., POUZET D., Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe. Projet de recherche ODEADOM, 2008. Partie II : Programme de recherche, 31 pages.

LEJARS C., POUZET D., Etude de faisabilité d'une unité pilote de valorisation énergétique de la biomasse cannière en Guadeloupe. Projet de recherche ODEADOM, 2008. Partie III : Etude de faisabilité technique pour la construction d'un pilote industriel, 63 pages.

MANCERON S., CAUSERET F., BLAZY, J.M., Banamarge, Outil de simulation technico-économique des exploitations bananières pour l'aide à la décision. 2010.

MERLE.T, 2012. Guide de l'outil REBECCA-ACV v1.0 : Application de la méthodologie ACV au projet REBECCA.

PRERURE, 2008. Plan Energétique Régional Pluriannuel de Prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation rationnelle de l'énergie de la Guadeloupe à l'Horizon 2020. Région Guadeloupe, Explicit, ADEME.

ANNEXES

Notes scientifiques REBECCA numérotées

1- Chopart JL, 2011. Premières estimations de production de 6 variétés de cannes à vocation énergie sur des parcelles test au Fromager (Basse-Terre) Note scientifique REBECCA n° 1, avril 2011, 5 p.

2- Chopart JL, 2011. Point sur les activités et études réalisées entre le 1^{er} avril et le 7 juin et programmées en phase 1. Note scientifique REBECCA n° 2, juin 2011, 17 p.

3- Auzoux S, Chopart JL, De Saint-Seine G., 2011. REBECCA-BD.A (V1.0), base de données agronomiques du programme REBECCA : présentation et guide de l'utilisateur. Note scientifique REBECCA n°3, septembre 2011, 17p.

4- Chopart JL, 2012a. Rapport d'exécution de la première année du programme REBECCA, de mai 2010 à mai 2011. Activités, premiers résultats et indicateurs. Note scientifique REBECCA n°4, janvier 2012, 15 p.

5- Chopart JL, 2012b. Activités et études réalisées entre le 20 septembre 2011 et le 31 janvier 2012, (volets agro-variétal et chlordécone dans le système sol plante. Codir 5, 1 février 2012, Note scientifique REBECCA n°5, janvier 2012, 15 p.

6- Chopart JL, 2012c. Résultats du programme REBECCA phase 1 de septembre 2011 à mars 2012, Volet agro-variétal, Modèle d'estimation de la qualité de la biomasse par des mesures SPIR, chlordécone dans le système sol-plante, COPIL 4, 17 avril 2012. Note scientifique REBECCA n°6, avril 2012, 32 p.

7- Chopart JL, 2012d. Programme REBECCA. Rapport d'exécution n°2. Période du 1^{er} juin 2011 au 31 janvier 2012. Note scientifique REBECCA n°7, 31 p.

8- Merle T, 2012. Guide de l'Outil REBECCA-ACV v1.0 Méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie : Application au programme REBECCA pour l'évaluation environnementale d'une filière canne à usage de combustible. Note scientifique REBECCA n°8, 49 p.

9- Chopart JL, Marie P, 2012. Estimation de la biomasse résiduelle potentiellement disponible après une culture de canne à usage de combustible dans le Sud de la Guadeloupe. Note scientifique REBECCA n°9, juin, 17p.

10- Marie P, Chopart JL, 2012. Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines de cinq variétés de canne à sucre dans un sol volcanique pollué de Guadeloupe. Note scientifique REBECCA n° 10, juillet 2012, 17p.

11- Marie P, Chopart JL 2012b. Il n'y a pas de chlordécone dans des cendres issues de la combustion en chaudière industrielle de la bagasse de canne à sucre cultivée sur un sol contaminé Note scientifique REBECCA n° 11, juillet 2012, 4p.

12- Lejars C, Fusillier JL. 2012. *Faisabilité économique de la mise en place d'une unité de production d'électricité à partir de biomasse canne. Outils d'analyse et premiers résultats. Note scientifique REBECCA n° 12, juillet 2012, 44p.*

Documents non numérotés

Rapport d'exécution d'assistance technique INRA

Blazy JM, Causeret F, Chopin P, Diman JL, Guindé L 2012. *Estimation du gisement agricole potentiel pour une filière de production d'électricité à partir de biomasse issue de canne à fibres à Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe. Rapport final d'exécution d'assistance technique INRA, 60 p.*

Rapports de stage

Bilionière M 2011. *Vers une production de biomasse dédiée à l'énergie dans le sud de la Basse-Terre. Eléments économiques : état des lieux et marges à générer pour rendre la spéculation attrayante pour l'agriculteur. Mémoire de MasterII UAG. Dir mémoire P Borda, co Dir JL Chopart, 80 p.*

De Saint-Seine G 2011. *Contribution au démarrage d'un projet de recherche sur la canne à sucre à vocation combustible. Rapport de stage Montpellier sup Agro, 33 p*

Marie Pauline 2012. *Devenir de la chlordécone dans la canne à sucre, de l'absorption à la combustion. Contribution à une réflexion sur l'intérêt d'une filière canne combustible en Guadeloupe sur des sols contaminés. Rapport de stage d'ingénieur ISTOM (fin stage 5 aout, titre provisoire).*